



Proposition de chaîne numérique pour la fabrication additive

Renan Bonnard

► To cite this version:

Renan Bonnard. Proposition de chaîne numérique pour la fabrication additive. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2010. Français. NNT : . tel-00585342

HAL Id: tel-00585342

<https://theses.hal.science/tel-00585342>

Submitted on 12 Apr 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ecole Centrale de Nantes

ÉCOLE DOCTORALE

«Sciences Pour l'Ingénieur Géosciences Architecture» SPIGA

Année 2010

Thèse de DOCTORAT

Spécialité : GENIE MECANIQUE

Présentée et soutenue publiquement par :

RENAN BONNARD

le 2010 12 octobre 2010
à l'antenne de Bretagne de l'ENS Cachan

TITRE

PROPOSITION DE CHAÎNE NUMÉRIQUE POUR LA FABRICATION ADDITIVE

JURY

Président : Claire LARTIGUE

Professeur des universités, IUT de Cachan, Université Paris Sud 11

Rapporteurs : François VILLENEUVE
Walter RUBIO

Professeur des universités, Université Joseph Fourier, Grenoble
Professeur des universités, Université Paul Sabatier, Toulouse III

Examineurs : Ian STROUD
Jean-Yves HASCOËT
Pascal MOGNOL

Adjoint scientifique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Professeur des universités, École Centrale de Nantes
Professeur des universités, Antenne de Bretagne de l'ENS Cachan

Directeurs de thèse : Pascal MOGNOL / Jean-Yves HASCOËT

Laboratoire : Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, UMR CNRS 6597

N° ED 498-129

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier mes directeurs de thèse, Pascal Mognol et Jean-Yves Hascoët pour m'avoir permis de réaliser ce travail dans d'excellentes conditions. Vous avez réussi à créer un climat propice à mon épanouissement professionnel en me laissant acquérir une certaine autonomie tout en sachant recadrer et orienter l'ensemble dès que nécessaire. Merci beaucoup ! J'ai beaucoup appris à votre contact.

J'adresse également de sincères remerciements aux membres du jury : Claire Lartigue pour m'avoir fait l'honneur d'assurer la présidence, Walter Rubio et François Villeneuve pour avoir accepté de rapporter mes travaux et pour m'avoir proposé des retours sur la base d'une discussion scientifique constructive et Ian Stroud pour son expertise dans les domaines traités.

Je souhaite remercier l'ensemble des membres de l'équipe MO2P de l'IRCCyN, notamment pour les agréables moments passés lors de nos déplacements. Ces travaux de thèse ont été réalisés au sein de l'antenne de Bretagne de l'ENS Cachan, j'aimerais donc chaleureusement en remercier l'ensemble du personnel, en particulier Régis, Sébastien, Philippe B. et Philippe B. pour les réunions techniques. Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel du département mécatronique de l'ENS Cachan antenne de Bretagne et en particulier l'équipe enseignante avec qui j'ai passé d'agréables moments. Merci aussi à Olivier, Julien, Fred, Pierre et Rémi pour les bons moments passés au travail et en dehors (notamment du côté du petit vélo...).

Au-delà de l'aspect purement professionnel, ce travail représente 3 années de ma vie, et c'est donc très logiquement que j'ai une pensée pour tous ceux qui m'ont côtoyé durant cette période. J'aimerais ainsi adresser de profonds remerciements à mes parents et Yannick. Vous m'avez toujours encouragé à aller plus loin dans les domaines qui me plaisent, je vous en suis reconnaissant aujourd'hui. C'est ce qui m'a sûrement conduit à réaliser ces travaux de thèse.

Je remercie aussi l'ensemble de mes amis de plus longue date qui m'ont permis de maintenir un équilibre nécessaire lors de la réalisation d'un projet comme la thèse. Je remercie en particulier Mika, Oliv, Palulu, Aymeric et l'ensemble de la clique rennaise (Solenn, Mumu, Marine, Lucie, Dodo, Eno, Sophie, Marie-Charlotte, Paulo...) pour tous les bons moments passés ensemble, même si ceux-ci n'étaient pas dédiés à faire avancer la recherche française en Génie Mécanique. Egaleme nt un grand merci à tous les Cachanais et Ker-lannais que j'ai côtoyés pendant ces trois ans et en particulier François, Raph, Jojo et Charles.

Table des matières

Remerciements	3
Table des illustrations	11
Glossaire.....	15
Chapitre 1	
Contexte général de l'étude	18
1. Contexte général.....	19
2. La chaîne numérique en fabrication	21
2.1 Evolution de l'organisation des données numériques	21
2.2 Nouveaux enjeux pour l'échange et la capitalisation des données numériques.....	21
2.3 Etat actuel des recherches au niveau de la chaîne numérique en fabrication	
24	
2.4 Conclusion	26
3. Les procédés par ajout de matière.....	27
3.1 Définition.....	27
3.2 Evolution des procédés de fabrication par ajout de matière.....	29
3.3 Domaines d'application des procédés de fabrication par ajout de matière	30
3.4 Les procédés de fabrication par ajout de matière, des procédés aujourd'hui matures et concurrentiels.....	31
3.5 Conclusion	34
4. La chaîne numérique en fabrication par ajout de matière.....	35
4.1 Contexte	35
4.2 Limites et manques dans la chaîne numérique	35
4.3 Illustration des limites de la chaîne numérique actuelle.....	36
4.4 Proposition d'une nouvelle chaîne numérique en fabrication additive	40
4.5 Méthodologie d'introduction des procédés de fabrication par ajout de matière dans un standard de haut niveau conceptuel.....	40
5. Synthèse sur le contexte général de l'étude et le plan du manuscrit	42

Chapitre 2

Etat de l'art / Problématique	44
1. Introduction.....	45
2. Etat de l'art sur les propositions de nouveaux standards de données pour la fabrication additive.....	46
2.1 Le format LMI	46
2.2 Le format VRML	46
2.3 Le format CS File	47
2.4 Le format PLY	47
2.5 Le format ETL.....	47
2.6 Autres formats proposés	47
2.7 Proposition récente d'un nouveau format STL 2.0.....	48
2.8 Conclusion	50
3. Etat de l'art des modèles de description des procédés existants de fabrication additive	51
3.1 Les modèles de description complets	51
3.2 Description des différentes technologies de fabrication additive.....	54
3.3 Aide au choix des procédés de fabrication additive	56
3.4 Virtualisation en fabrication additive	57
3.5 Modèle intégrant de l'optimisation et/ou de la simulation	57
3.6 Autres modèles.....	57
3.7 Conclusion	58
4. Un outil pour une chaîne numérique performante : le format de haut niveau conceptuel STEP	59
4.1 La norme STEP ISO 10303	59
4.1.1 Définition	59
4.1.2 Organisation de la norme STEP ISO 10303.....	60
4.1.3 Le langage de description EXPRESS	61
4.1.4 Organisation de la norme ISO 10303 en protocoles d'application	63
4.1.5 La norme STEP pour la réalisation de produits manufacturés	64
4.1.6 Conclusion	65
4.2 La norme STEP un outil adapté pour la chaîne numérique performante en fabrication additive	65
4.2.1 Situation de la fabrication additive avec le format STL	65
4.2.2 Travaux sur l'utilisation du format STEP en fabrication additive.....	66
4.3 La norme STEP au niveau du directeur de commande numérique : le format STEP-NC	69
4.3.1 Définition	69

4.3.2	Organisation et fonctionnement de la norme STEP-NC.....	71
4.3.3	Description des pièces usinées dans la norme STEP-NC	73
4.3.4	Synthèse bibliographique des travaux sur le format STEP-NC.....	75
4.3.5	Nouvelles possibilités avec le format STEP-NC	77
4.3.6	STEP-NC et fabrication additive : évolution et perspectives	78
4.4	Plateformes STEP-NC développées à travers le monde	79
4.4.1	L'intégration du standard STEP-NC sur des machines de fabrication ..	79
4.4.2	Etat de l'art des plateformes STEP-NC existantes	80
4.5	Conclusion	81
5.	Problématique de nos travaux de recherche	82
 Chapitre 3		
Nouveau modèle hiérarchisé d'organisation des données numériques.....		84
1.	Introduction.....	85
2.	Nouveau modèle de description des données.....	86
2.1	Objectifs généraux	86
2.2	Un modèle innovant pour la gestion des données en fabrication additive ..	86
2.3	Structuration des données.....	88
2.4	Modèle hiérarchisé basé entités.....	89
2.5	Apports de ce nouveau modèle.....	90
3.	Le modèle hiérarchisé des données des procédés d'ajout de matière....	92
3.1	Présentation.....	92
3.2	Organisation du modèle.....	93
3.3	Première partie : description de l'espace de travail	94
3.3.1	Niveau 1 : description du projet de fabrication additive	95
3.3.2	Niveau 2 : description de la pièce	95
3.3.3	Niveau 3 : description de la machine	97
3.4	Deuxième partie : Réglage des paramètres et Programme	101
3.4.1	Niveau 4 : description de la préparation de la fabrication	101
3.4.2	Niveau 5 : description du programme.....	107
3.5	Troisième partie : Fabrication et Post-production.....	108
3.5.1	Niveau 6 : description de la fabrication	108
3.5.2	Niveau 7 : description de la post-production	108
3.6	Synthèse sur le modèle complet et hiérarchisé des données.....	110
4.	Exemple de description du modèle hiérarchisé des données.....	111
4.1	Présentation du contexte de l'exemple	111

4.2	Choix de la pièce-test	111
4.3	Première partie du modèle de l'exemple	112
4.4	Deuxième partie du modèle de l'exemple	118
4.5	Troisième partie du modèle de l'exemple	121
4.6	Synthèse sur l'exemple	123
5.	Points forts du nouveau modèle d'organisation des données numériques	124
Chapitre 4		
Nouveau modèle ISO 14649 pour la fabrication additive		126
1.	Introduction	127
2.	Organisation des données dans la norme ISO 14649	128
2.1	Principaux objectifs de la norme ISO 14649	128
2.2	Organisation de la norme ISO 14649	128
2.3	Structure générale de l'ISO 14649	131
3.	Stratégie d'introduction des procédés de fabrication additive dans la norme ISO 14649	132
3.1	Présentation de la norme ISO 14649 part 10	132
3.2	Stratégies d'intégration des données de fabrication additive dans la norme ISO 14649	133
4.	Proposition de modèle STEP-NC pour la fabrication additive	136
4.1	Méthodologie pour la proposition d'un modèle ISO 14649 pour la fabrication additive	136
4.2	Relations entre les différents niveaux du modèle hiérarchisé	137
4.3	Données fabrication additive à intégrer dans la norme ISO 14649 et leurs emplacements	138
4.4	Proposition d'un nouveau modèle ISO 14649 à partir du modèle hiérarchisé	138
4.5	Données introduites dans la <i>part 10</i> de la norme ISO 14649	140
4.5.1	Nouveau modèle ISO 14649 unités de mesure nécessaires à la fabrication additive	140
4.5.2	Définition d'un projet de fabrication additive	142
4.5.3	Description actuelle de pièces fabriquées en usinage avec la norme STEP-NC : notion de Workpiece	142
4.5.4	Proposition d'un nouveau modèle pour les pièces par ajout de matière : AM_workpiece	143

4.5.5	Nouveau modèle ISO 14649 AM_Workingstep.....	147
4.5.6	Nouveau modèle ISO 14649 pour la programmation en fabrication additive 149	
4.6	Données introduites dans la <i>part 17</i> de la norme ISO 14649.....	150
4.6.1	Nouvelle définition des entités de fabrication additive AM_features	150
4.6.2	Nouvelle définition des opérations de fabrication additive AM_operation ...	152
4.6.3	Nouvelle définition des technologies de fabrication additive AM_technology 153	
4.6.4	Nouvelle définition des paramètres de l'enceinte de fabrication additive AM_machine_function	154
4.6.5	Nouvelle définition des stratégies de fabrication additive AM_strategy	155
4.6.6	Nouvelle définition de la structure des pièces de fabrication additive AM_structure	157
4.7	Données introduites dans la <i>part 171</i> de la norme ISO 14649.....	160
4.8	Modèle complet ISO 14649 pour la fabrication additive.....	161
5.	Conclusion	164
5.1	Limites du modèle proposé	164
5.2	Apports du modèle propose	164

Chapitre 5

Validation du modèle STEP-NC avec la plateforme SPAIM..... 168

1.	Introduction.....	169
2.	Plateforme STEP-NC pour la fabrication additive.....	170
2.1	Définition et objectifs de cette nouvelle plateforme.....	170
2.2	Proposition de structure pour une plateforme STEP-NC fabrication additive 171	
2.3	Conclusion	174
3.	Génération automatique d'un programme STEP-NC pour la fabrication additive.....	175
3.1	Définition.....	175
3.2	Proposition d'un nouveau programme PosSFP-AM	175
3.2.1	Reconnaissance automatique des entités de fabrication	175
3.2.2	Génération automatique d'un programme ISO 14649.....	176
3.3	Conclusion	182
3.3.1	Limites du programme PosSFP-AM de génération automatique d'un fichier STEP-NC fabrication additive	182
3.3.2	Apports de ce nouveau programme	183

4. Chaîne numérique STEP-NC en fabrication additive avec la plateforme SPAIM	184
4.1 Organisation et fonctionnement	184
4.2 Apports de la plateforme SPAIM.....	187
4.3 Conclusion	188
4.3.1 Vers une programmation avancée des machines de fabrication additive ...	188
4.3.2 Nouveau concept de fabrication multi-process STEP-NC	189
5. Conclusion	191
 Chapitre 6	
Conclusions et Perspectives.....	192
1. Synthèse des travaux effectués	193
2. Conclusions : les apports de notre travail	196
3. Perspectives.....	199
 Références Bibliographiques.....	202

Table des illustrations

Figure 1 : Vision d'une fabrication globale et interopérable.....	22
Figure 2 : Chaîne numérique performante d'un projet de fabrication	23
Figure 3 : Chaîne numérique actuelle en fabrication [NEW08].....	25
Figure 4 : Chaîne numérique avec le format STEP-NC [NEW08]	25
Figure 5 : Principe de la fabrication lit de poudre [NOB05]	29
Figure 6: Principe de la fabrication par projection de poudre [NOB05].....	29
Figure 7 : Secteurs utilisant des pièces réalisées en fabrication additive [WOH10]	30
Figure 8 : Domaines d'application des pièces réalisées en fabrication additive [WOH10].....	31
Figure 9 : Évolution du cycle de développement d'une technologie [LEV03]	32
Figure 10 : Chaîne numérique actuelle en fabrication rapide	36
Figure 11 : Situation actuelle d'un projet de fabrication additive	39
Figure 12 : Proposition de chaîne numérique pour la fabrication rapide	40
Figure 13 : Méthodologie pour l'intégration des procédés de fabrication additive dans un standard de haut niveau conceptuel	41
Figure 14 : Exemple de description d'une pièce multi-matériaux (FGM) avec le nouveau format AMF	48
Figure 15 : Quatre principaux aspects des procédés de fabrication additive [CHU98]	52
Figure 16 : Architecture d'un modèle de description et d'aide au choix pour l'outillage rapide [DIN04].....	53
Figure 17 : Structuration des différentes technologies en fabrication additive [PHA98].....	54
Figure 18 : Structuration des technologies métalliques en fabrication additive [COS06]	55
Figure 19 : Description des technologies métalliques en fabrication additive [LEV03]	56
Figure 20 : Structure de la norme STEP	60
Figure 21 : Exemple de hiérarchisation des données dans le langage EXPRESS	62
Figure 22 : Exemple de représentation EXPRESS-G	62
Figure 23 : Cycle de développement d'un protocole d'application	64
Figure 24 : Principaux protocoles d'application utilisés lors d'un projet de fabrication.....	65
Figure 25 : Introduction de la fabrication additive dans la structure STEP-NC	67
Figure 26 : Interface coréenne pour le prototypage rapide [RYO06]	68
Figure 27 : Organisation des normes ISO 14649 et ISO 10303	71
Figure 28 : Comparaison entre l'ISO 6983 [ISO82] et l'ISO 14649 [ISO03a]	72
Figure 29 : Structure d'un fichier STEP-NC [ESP00]	72
Figure 30 : Organisation d'un fichier STEP-NC [ESP00].....	73
Figure 31 : Exemple d'une pièce avec poche	74
Figure 32 : Exemple d'une phase d'usinage sur une pièce	74
Figure 33 : Différentes étapes avant une programmation avancée [LAG09b]	79
Figure 34 : Principales informations d'un projet de fabrication additive	87

Figure 35 : Méthode d'obtention d'un modèle hiérarchisé des données de fabrication additive	88
Figure 36 : Environnement numérique d'un projet de fabrication additive	90
Figure 37 : Organisation de l'environnement numérique global en fabrication additive	91
Figure 38 : Modèle hiérarchisé des données de fabrication additive	93
Figure 39 : Organisation du modèle hiérarchisé des données	94
Figure 40 : Description d'un projet de fabrication additive	95
Figure 41 : Description non-géométrique d'une pièce de fabrication additive	96
Figure 42 : Description géométrique d'une pièce de fabrication additive	97
Figure 43 : Description des technologies de fabrication additive	99
Figure 44 : Description de la géométrie de la machine de fabrication additive	100
Figure 45 : Description de la cinématique/dynamique de la machine de fabrication additive	101
Figure 46 : Description du modèle produit pour la fabrication additive	103
Figure 47 : Description des paramètres outils pour la fabrication additive	104
Figure 48 : Description des paramètres de la chambre de fabrication pour la fabrication additive	104
Figure 49 : Stratégies et trajectoires en fabrication additive	105
Figure 50 : Structure d'une pièce en fabrication additive	106
Figure 51 : Besoin de supports en fabrication additive	107
Figure 52 : Programme en fabrication additive	107
Figure 53 : Fabrication additive	108
Figure 54 : Opérations de finition	109
Figure 55 : Métrologie d'une pièce réalisée en fabrication additive	109
Figure 56 : Développement durable pour les procédés de fabrication additive	110
Figure 57 : Pièce-test et ses entités géométriques	111
Figure 58 : Dessin de définition de la pièce-test	112
Figure 59 : Description du projet de fabrication additive de la pièce-test	113
Figure 60 : Description géométrique de la pièce-test	114
Figure 61 : Description non géométrique de la pièce-test	115
Figure 62 : Machine CLAD de projection de poudre de l'IRCCyN	115
Figure 63 : Description de la technologie de fabrication additive de la machine CLAD	116
Figure 64 : Description de la géométrie de la machine CLAD	117
Figure 65 : Description de la cinématique de la machine CLAD	117
Figure 66 : Description du modèle produit pour la pièce-test	119
Figure 67 : Description des outils de fabrication additive	119
Figure 68 : Paramètres de la chambre de la machine	119
Figure 69 : Structure de la pièce-test	120
Figure 70 : Description des trajectoires et stratégies de fabrication additive pour la pièce-test	120
Figure 71 : Description du programme pour la pièce-test	121
Figure 72 : Modèle pour la fabrication de notre pièce-test	121
Figure 73 : Modèle pour la finition de la pièce-test	122
Figure 74 : Modèle de métrologie de notre pièce-test	122

Figure 75 : Modèle de post-production de notre pièce-test	122
Figure 76 : Modèle complet des données dans une chaîne numérique complète	124
Figure 77 : Cycle de fabrication et utilisation de la norme ISO 14649 dans ce cycle [ISO03a]	129
Figure 78 : Description générale du modèle de données [ISO03a]	130
Figure 79 : Organisation des normes STEP [ISO03a]	130
Figure 80 : Organisation actuelle de l'ISO 14649	131
Figure 81 : Proposition 1 pour l'introduction des données d'additive manufacturing dans l'ISO 14649	134
Figure 82 : Proposition 2 pour l'introduction des données d'additive manufacturing dans l'ISO 14649	135
Figure 83 : Méthodologie d'obtention d'un modèle complet de fabrication additive	136
Figure 84 : Modèle SADT des étapes du modèle hiérarchisé	137
Figure 85 : Exemple de passage du modèle hiérarchisé au modèle EXPRESS-G	139
Figure 86 : Plan de la <i>part 10</i> actuelle et intégration des nouvelles données fabrication additive	140
Figure 87 : Diagramme EXPRESS-G des nouvelles unités de mesure	141
Figure 88 : Diagramme EXPRESS-G d'un projet de fabrication	142
Figure 89 : Exemple d'une pièce de fabrication additive décomposée en STEP-NC_AM ...	145
Figure 90 : Nouvelle organisation des entités de fabrication	146
Figure 91 : Diagramme EXPRESS-G de description du workpiece	147
Figure 92 : Diagramme EXPRESS-G de description des workingstep	149
Figure 93 : Diagramme EXPRESS-G des entités de fabrication additive	151
Figure 94 : Représentation de l'entité de fabrication plane_conformal_cooling	151
Figure 95 : Diagramme EXPRESS-G de description des AM_operation	153
Figure 96 : Diagramme EXPRESS-G de description des AM_technology	154
Figure 97 : Diagramme EXPRESS-G de description des AM_machine_functions	155
Figure 98 : Diagramme EXPRESS-G de description des AM_strategy	156
Figure 99 : Diagramme EXPRESS-G de description des AM_structure	159
Figure 100 : Diagramme EXPRESS-G de description des AM_tool	161
Figure 101 : Diagramme EXPRESS-G de description des AM_tool_body	161
Figure 102 : Modèle de données fabrication additive ISO 14649	163
Figure 103 : Possibilités avec notre nouveau modèle STEP-NC fabrication additive	166
Figure 104 : Structure fonctionnelle d'une plateforme STEP-NC pour la fabrication additive	172
Figure 105 : Module d'obtention du code DCN à partir du programme STEP-NC	173
Figure 106 : Module de reconnaissance automatique des entités de fabrication	176
Figure 107 : Importation du modèle CAO dans PosSFP-AM et reconnaissance des entités de fabrication	176
Figure 108 : Module de génération automatique d'un programme ISO 14649	177
Figure 109 : Choix des opérations de fabrication additive dans PosSFP-AM	177
Figure 110 : Liste des opérations de fabrication additive qui permet de régler les paramètres associés	178
Figure 111 : Choix d'une source d'énergie dans PosSFP-AM	178

Figure 112 : Définition générale des paramètres de fabrication dans PosSFP-AM	179
Figure 113 : Définition des paramètres liés à la structure de la pièce dans PosSFP-AM	180
Figure 114 : Définition de la stratégie de fabrication dans PosSFP-AM	180
Figure 115 : Définition des paramètres de l'enceinte de fabrication dans PosSFP-AM	181
Figure 116 : Définition des paramètres liés à la technologie de fabrication dans PosSFP-AM	181
Figure 117 : Programme STEP-NC fabrication additive généré par PosSFP-AM	182
Figure 118 : Machine de projection de poudre de l'IRCCyN procédé CLAD	184
Figure 119 : Structure de la plateforme SPAIM pour la fabrication additive [LAG09b]	185
Figure 120 : Interface Homme/Machine de la plateforme SPAIM	186
Figure 121 : Nouvelle chaîne numérique STEP-NC fabrication additive avec la plateforme SPAIM.....	188
Figure 122 : Plateforme de supervision multi-process	190
Tableau 1 : Principaux procédés de fabrication par ajout de matière [WOH10] [VER09]	28
Tableau 2 : Différentes parties de l'ISO 14649 et leurs phases de développement	70
Tableau 3 : Partenaires travaillant sur le projet IMS [XU03].....	76
Tableau 4 : Renseignements des paramètres de fabrication de la pièce-test	118
Tableau 5 : Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients des stratégies d'introduction de la fabrication dans la norme ISO 14649.....	134
Tableau 6 : Emplacements des données du modèle hiérarchisé dans l'ISO 14649	138

Glossaire

AM : Additive Manufacturing. Désignation anglaise des procédés de fabrication par ajout de matière.

CAO : Conception Assistée par Ordinateur. Un modèle CAO est un modèle numérique en trois dimensions représentant un objet dans un logiciel de CAO.

CFAO : Conception - Fabrication Assistées par Ordinateur. Voir CAO et FAO.

CLAD : Procédé de fabrication additive par projection de poudre développé par IREPA laser et l'iRCCyN. Le principe est le suivant, la poudre est projetée directement dans le faisceau du laser qui la fait fusionner. Cette machine permet la fabrication additive en 5 axes.

DCN : Directeur de Commande Numérique.

DMLS : Direct Metal Laser Sintering (ou frittage laser de poudre métallique). C'est un procédé de fabrication par ajout de matière, utilisant une technologie lit de poudre, et développé par la société allemande EOS. Voir SLS.

EXPRESS : C'est un langage informatique servant à spécifier formellement des données. Il a fait l'objet d'une normalisation (ISO 10303-11). Ce langage permet donc de définir une représentation non ambiguë des données, interprétable par un système informatique ce qui permet de générer directement et automatiquement un grand nombre d'éléments à partir d'un modèle EXPRESS.

Fabrication additive (ou fabrication directe ou fabrication rapide ou fabrication par ajout de matière) : Ensembles de procédés de fabrication ayant comme point commun l'apport itératif de matière (soit point par point, soit couche par couche), par opposition aux techniques d'usinage qui procèdent par enlèvement de matière.

FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur. La FAO constitue une aide numérique pour la préparation de la fabrication d'une pièce par usinage, et peut également s'étendre à la préparation de la fabrication par d'autres procédés.

FDM : Fused Deposition Modelling. Procédé de fabrication additive, selon lequel une buse se déplace suivant trois axes et dépose un fil en fusion qui se solidifie au contact de la section précédente.

FGM : Functionally Graded Materials. Type de réalisation de pièces multimatériaux, c'est une forme de composite dont les propriétés changent avec la géométrie de la pièce. Ce

changement vient d'une évolution de la composition chimique du matériau suivant sa position dans la pièce.

Format STL : Format d'échange actuel entre le logiciel de CAO et la machine de fabrication rapide. Il s'agit d'une représentation par triangles des surfaces d'un modèle CAO.

Informations de haut niveau conceptuel : Voir la définition de standard de haut niveau conceptuel.

LOM : Laminated Object Manufacturing (ou lamination). Procédé de fabrication rapide, par empilage de couches de matériaux thermocollant automatiquement découpées par un laser de puissance.

Prototypage rapide : La notion de prototypage rapide signifie littéralement « fabrication rapide de modèles et prototypes » et désigne différents procédés permettant de restituer physiquement des objets 3D, décrits par leurs données CAO, sans outillage et dans un temps beaucoup plus court que par les techniques classiques. Aujourd'hui, cette définition ne se cantonne plus aux modèles et prototypes, c'est pourquoi nous parlons de Fabrication rapide.

Outillage : Selon le dictionnaire Petit Larousse, le terme « outillage » renvoie la définition très large suivante : « Ensemble des outils nécessaires à une profession ou à un travail ». En se restreignant au domaine de la transformation de matière, il s'agit alors de pièces permettant la mise en forme de produits.

SLA : Stéréolithographie. Procédé de fabrication additive, selon lequel une résine liquide photosensible est polymérisée sous l'action d'un laser dont le faisceau est projeté à la surface par un jeu de miroir dynamique. Sur son passage, le laser fond la résine et seule la région balayée est solidifiée.

SLS : Selective Laser Sintering (ou frittage laser sélectif). Procédé de fabrication additive, selon lequel une poudre est agglomérée par frittage sous l'action d'un laser dont le faisceau est projeté à la surface par un jeu de miroir dynamique. Sur son passage, le laser fond la poudre et seule la région balayée est solidifiée.

Standard de haut niveau conceptuel :

STEP : **S**tandard for the **E**xchange of **P**roduct Model Data. Egalement appelé **ISO 10303**, cette norme porte sur la représentation et l'échange de données de produits et a pour objectif d'intégrer les processus de conception, de développement, de fabrication et de maintenance de ces derniers. Cette méthode permet donc de définir une représentation non ambiguë des données du produit, interprétable par tout système informatique, et couvrant tout le cycle de vie des produits.

STEP-NC : STEP compliant **N**umerical **C**ommand. C'est un standard d'échange de données pour la programmation de commande numérique. Il est basé sur le standard STEP et permet d'intégrer complètement la chaîne numérique CAO-CFAO-CN. Il regroupe à la fois les propriétés du STEP et des informations de haut niveau en vue de la fabrication du produit. Le standard STEP-NC est normalisé à travers la norme ISO 14649 (ARM: Application Reference Model) et le protocole d'application 10303-AP238 (AIM: Application Interpreted Model).

Chapitre 1

Contexte général de l'étude

1. Contexte général

Depuis une quarantaine d'années, les marchés internationaux de plus en plus concurrentiels et la mondialisation ont entraîné une modification en profondeur dans les entreprises manufacturières. Ainsi, les coûts de fabrication, les délais de production et le temps de mise au point sont plus faibles et plus courts qu'auparavant. Par ailleurs, le degré d'exigence en termes de qualité et de flexibilité, de la part des clients, lui ne cesse d'augmenter. Si l'on prend l'exemple du secteur automobile, nous sommes passés de la fabrication d'une voiture unique chez chaque constructeur dans les années 20 (par exemple la Ford T aux Etats-Unis), à la production de voitures de plus en plus personnalisées, c'est ainsi que BMW annonce que la Série 7 se décline en un nombre record de 10^{17} alternatives [HU08]. De plus, les modèles ou séries des constructeurs automobiles changent plus régulièrement (3 ans en moyenne), alors qu'il y a trente ans un modèle était fabriqué pour 5 ans. Se pose donc la question des temps de développement et de mise au point de plus en plus courts pour les nouveaux modèles.

Par ailleurs, les moyens de développement de projets de fabrications ont fortement évolué ces dernières années. Ainsi, la gestion des données d'un projet de fabrication est passée d'un environnement de travail sur papier (dessin de définition sur planche à dessiner, schémas faits à la main...), à un environnement tout numérique de plus en plus performant, dans lequel les modélisations numériques 3D sont les modèles de référence (CAO, FAO, modèles éléments finis,...). En parallèle, des progrès substantiels ont été réalisés dans la mise au point de nouvelles machines et de procédés de fabrication.

Tous ces changements opérés dans l'industrie manufacturière en très peu de temps ont donc nécessité de faire évoluer les comportements. Ainsi, les entreprises exerçant leurs activités dans des domaines hautement compétitifs (tels que l'automobile ou l'aérospatial) doivent de plus en plus pouvoir former des partenariats et réseaux avec des sous-traitants. Tous ces acteurs doivent donc augmenter leur flexibilité et avoir une réaction quant aux attentes des clients et/ou donneurs d'ordre. Cela d'autant plus que bien souvent les sites de production et de développement ne sont pas situés au même endroit. C'est pourquoi, elles ont désormais besoin de faire partie intégrante d'un réseau numérique incluant toutes les phases de vie du produit développé. Elles doivent donc résoudre le problème de l'intégration, de l'échange, et de l'archivage à long terme des données techniques qui constituent leur patrimoine informationnel.

Il aura pratiquement fallu un siècle à l'environnement numérique des projets de fabrication par enlèvement de matière pour atteindre un ensemble cohérent et performant. Les procédés très jeunes, que sont les procédés de fabrication additive, ne peuvent se permettre d'attendre le même délai dans le contexte international actuel, s'ils veulent perdurer. De nouvelles propositions doivent donc être faites pour hisser la chaîne numérique des procédés de fabrication par ajout de matière au même niveau de performance que les procédés de fabrication concurrents.

Nous verrons donc dans la suite de ce chapitre quel est l'état actuel de la chaîne numérique en général. Ensuite, nous présenterons les procédés de fabrication par ajout de matière, ainsi que les points faibles de sa chaîne numérique actuelle. Enfin, nous

présenterons une méthodologie pour arriver à un ensemble numérique performant en fabrication additive.

2. La chaîne numérique en fabrication

2.1 Evolution de l'organisation des données numériques

Depuis une cinquantaine d'années la gestion des données qui composent un projet de fabrication a considérablement changé. Il y a encore quelques dizaines d'années et même moins pour certaines PME, les données collectées dans le cadre d'un projet de fabrication (bureau d'études et bureau des méthodes) étaient uniquement des données « papier » [BHA00] [FOR04] [XU04] [CUL07] [BUS08]. En parallèle, la fabrication était réalisée sur des machines conventionnelles qui nécessitaient la présence en permanence d'un opérateur. Nous sommes désormais passés à une situation dans laquelle toutes les données sont numériques (avec les progrès réalisés par l'informatique). Cela a donc permis l'introduction de logiciels de CAO, FAO et de simulation qui permettent d'aider à la réalisation d'un projet de fabrication avec des modélisations 3D plus performantes que des schémas 2D. De plus, la génération de programmes par les logiciels de FAO permet désormais le pilotage de machines plus performantes et complexes avec l'introduction des premières commandes numériques en 1952 au MIT (USA).

Le début de la gestion des données en numérique a été assez anarchique avec le développement par les fabricants de solutions CFAO et de directeurs de commandes numériques qui étaient des solutions dédiées qui ne pouvaient pas communiquer les uns avec les autres [TAN01] [NAS06]. A partir du constat de cette situation, des groupes de travail ont développé plusieurs formats d'échange standards pour permettre une meilleure communication entre les différents systèmes numériques : IGES [IGE80], ISO 10303 [ISO94a],... Cela a permis d'améliorer la situation, mais des efforts sont toujours nécessaires pour la gestion de ces données numériques.

Par ailleurs, la mise en œuvre des projets de réalisation de pièces fonctionnelles au sein des entreprises de fabrication modernes est elle aussi de plus en plus complexe, avec la multiplication des moyens humains (réseaux de sous-traitant, site délocalisés...), techniques, et des étapes pour arriver à la fabrication du produit fini. En effet, les outils de réalisation de ces projets sont plus variés (logiciels de CAO, logiciels de FAO, logiciels de simulation...) et les machines de fabrication (utilisant différents procédés : usinage, fabrication rapide, avec de multiples directeurs de commande numérique...) plus nombreuses et performantes. Associées à ces moyens pour la mise en œuvre de la production, les informations sur le projet (données de gestion de projet, modèles 3D, résultats de simulation ou optimisation...) sont elles aussi de plus en plus conséquentes. C'est pour cela qu'une forte évolution au niveau de la gestion et capitalisation des données numériques d'un projet de fabrication a été nécessaire.

2.2 Nouveaux enjeux pour l'échange et la capitalisation des données numériques

Les différentes étapes qui composent la réalisation d'un projet depuis la conception jusqu'à la fabrication du produit fini, dans un environnement numérique, s'appelle la « chaîne

numérique ». L'un des principaux enjeux de cette chaîne numérique est actuellement l'interopérabilité [RAY06] [XU06] [PAN08] [NEW08]. Comme le définit Ray et al. [RAY06] l'interopérabilité est la faculté d'un système de données numériques à échanger des informations en toute transparence. Comme montré par Newman et al. [NEW08], une entreprise de fabrication mécanique requiert une chaîne numérique hautement interopérable dans le but de maintenir sa flexibilité pour répondre le plus facilement et le plus rapidement possible à la demande de ses clients. Cette interopérabilité est d'autant plus nécessaire aujourd'hui avec la poursuite de la mondialisation et le recours à plusieurs sous-traitants pour la réalisation d'un même produit (Figure 1).

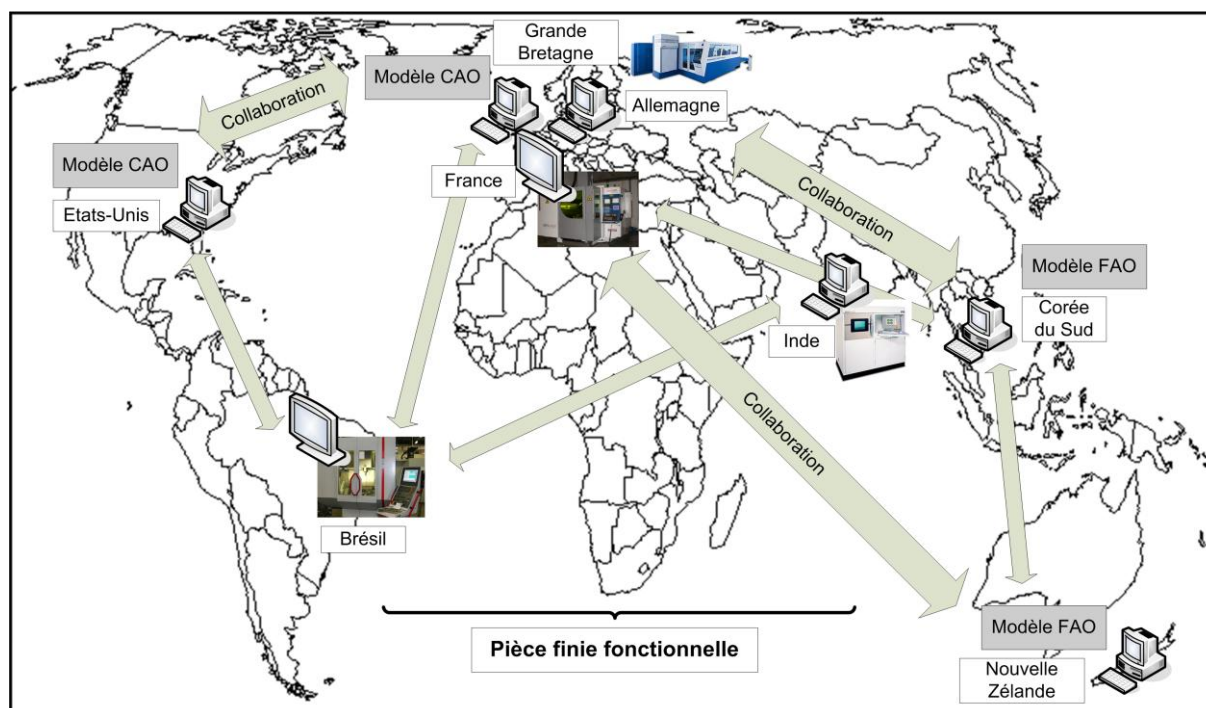


Figure 1 : Vision d'une fabrication globale et interopérable

Newman et al. [NEW08] ont mis en avant trois principaux impacts de l'intégration de l'interopérabilité sur les grandes mais aussi les moyennes et petites entreprises :

- Pour les grandes entreprises de l'automobile ou l'aéronautique, qui opèrent à l'échelle mondiale, l'interopérabilité leur permet d'échanger des données avec leurs clients et sous-traitants sans altération des données numériques et sans perte de temps en retraitement des données. Tout ceci permet d'arriver à la fabrication de pièces finies au moindre coût et en accord avec les exigences initiales.
- L'interopérabilité permettra aussi dans le futur de s'adapter plus facilement aux évolutions des logiciels de conception et de fabrication assistées par ordinateur ainsi, qu'aux machines de fabrication de nouvelles générations. Tout cela sans perdre un temps « précieux » en formation pour les ingénieurs ou en retraitement des pièces existantes par la chaîne numérique.
- Pour les petites et moyennes entreprises (PME), cela leur permettra d'accroître la flexibilité de leur fabrication, avec l'utilisation de données numériques venant

indifféremment de tel ou tel donneur d'ordre sans retraitement des informations, et la réalisation de fabrication sur n'importe laquelle de leur machine adaptée sans se soucier des post-processeurs ou des problèmes de commandes numériques.

Un gros travail au niveau de l'espace numérique d'un projet (voir Figure 2) est donc nécessaire pour arriver à un ensemble cohérent et interopérable au sein duquel, l'échange, l'obtention et la capitalisation de toutes les données du produit soient réalisés. Pour cela il est nécessaire de travailler dans un espace cohérent dans lequel :

- La communication entre les différents systèmes numériques est facilitée.
- Des modules de simulation et/ou d'optimisation sont facilement intégrables.
- L'échange de données se fait dans les deux sens entre les différents systèmes numériques (CAO, FAO, DCN,...).
- L'espace de travail est standardisé.

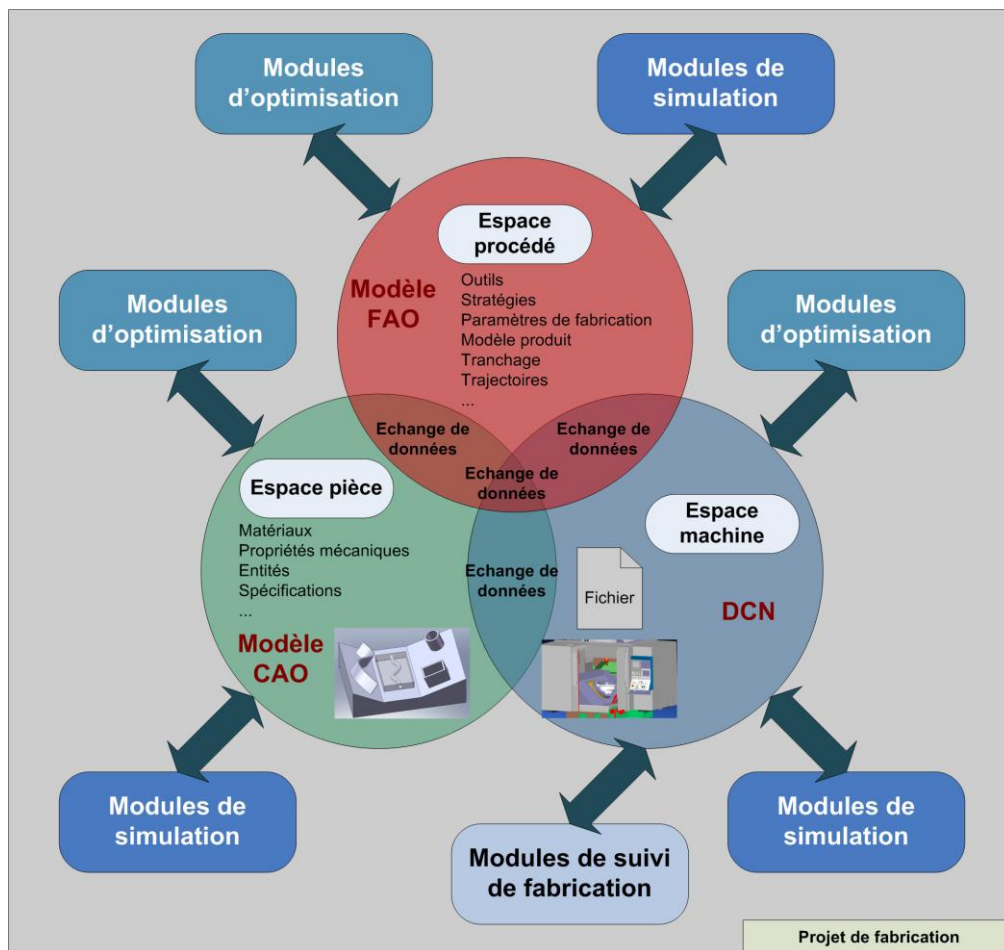


Figure 2 : Chaîne numérique performante d'un projet de fabrication

D'importants travaux de recherche ont été réalisés au niveau de la chaîne numérique pour la normalisation des données et la recherche d'un standard d'échange performant. En effet, la standardisation de ces données permet aux différents acteurs de la chaîne numérique (industriels, universitaires...) de pouvoir communiquer dans un unique et même langage et donc avoir un meilleur échange des données. Pour être performante, toute

chaîne numérique pour l'obtention de pièces fonctionnelles se doit de répondre aux critères et objectifs suivants :

- Intégration de la chaîne numérique CAO-FAO-DCN dans un unique standard de données de haut niveau conceptuel.
- Pas de perte de données durant les différentes étapes de la chaîne numérique et les post traitements.
- Non multiplication des fichiers de données lors de la chaîne numérique : un fichier unique regroupant toutes informations des étapes du projet est l'objectif à atteindre.
- Echange bidirectionnel des données au niveau de toutes les étapes du projet de fabrication.
- Exploitation des données facilement.
- Pas d'opérations de post-processing dans la chaîne numérique.

Cette astreinte à ces objectifs conditionne le bon déroulement d'un projet de fabrication au sein des entreprises. L'utilisation d'une chaîne numérique qui serait non-conforme à ces derniers, entraînerait des pertes de temps (en retraitement de fichiers, en recherche d'informations...) et de gains, si ce n'est dans le pire des cas l'obtention de produits finis non conformes avec le projet initial. C'est donc aujourd'hui un enjeu majeur que d'arriver à respecter ces conditions au niveau de la chaîne CAO/FAO/DCN.

De plus, de nombreuses études [SUH02a] [SUH03] [BIN04] [FOR04] [XU06] [MEK08] [HU09] préconisent que cette chaîne numérique, à l'inverse des premiers développements réalisés, soit la plus ouverte possible pour pouvoir être adaptée à tous types de logiciels et machines de fabrication. Ce type de structure permet désormais de pouvoir aller très loin au niveau des possibilités de l'environnement numérique de la fabrication :

- Modélisation d'entreprises virtuelles avec l'intégration de la CFAO et plus globalement de toutes les étapes de l'industrialisation d'un produit [ADA03] [BAL08] [LEE09].
- Intégration de plus en plus systématique de modules de simulation et d'optimisation [JAH10] [RID10].
- Possibilités accrues de mettre en place de l'e-manufacturing [RAU05] [ALV06] [SEO06] [SHI07] [ALV08a] [ALV08b] [LAN09].

Le développement de solutions toujours plus numériques, l'introduction de l'e-manufacturing, de logiciels de simulation, ... toujours plus performants est une réponse aux changements de l'industrie opérés au vingtième siècle avec la mondialisation des marchés, une concurrence forte, un besoin de flexibilité important et une délocalisation vers les pays à main d'œuvre à faibles coûts. Pour autant des progrès restent à réaliser notamment au niveau de l'intégration de la chaîne numérique dans un standard de haut niveau conceptuel.

2.3 Etat actuel des recherches au niveau de la chaîne numérique en fabrication

L'interopérabilité et la standardisation de la chaîne numérique sont des enjeux majeurs pour la réalisation de projet de fabrication.

Or la chaîne numérique actuelle en fabrication (voir Figure 3) ne répond pas complètement à ces objectifs. En effet, le flux des données est réalisé uniquement dans un seul sens : du modèle CAO vers le directeur de commande numérique. Les informations nécessaires (de bas niveau) sont ajoutées à chaque étape de la chaîne numérique. Les modifications faites au pied de la machine ou au niveau de la FAO ne sont pas prises en compte au niveau du modèle CAO. Cela a pour conséquence d'avoir des modèles qui peuvent être différents à chaque étape. De plus les solutions « propriétaires » développées par les constructeurs de machines (post-processeurs...) ne permettent pas d'avoir l'interopérabilité et la portabilité des informations.

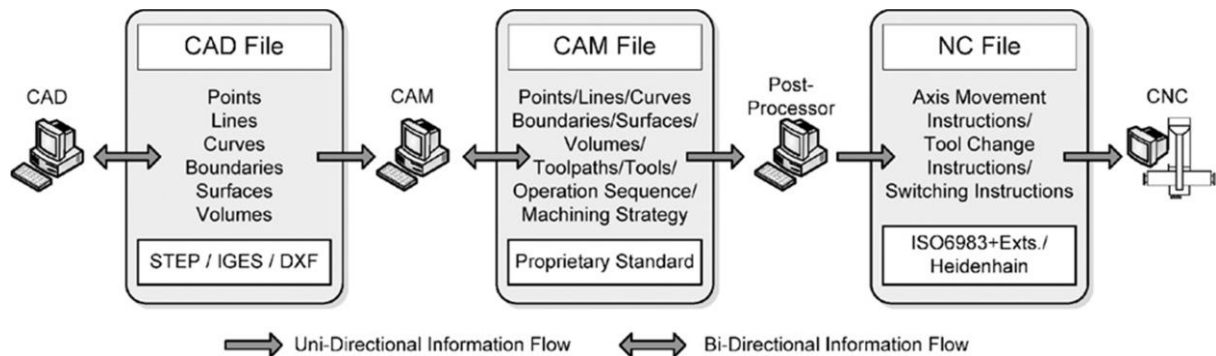


Figure 3 : Chaîne numérique actuelle en fabrication [NEW08]

Sous une impulsion internationale et pour pallier ces problèmes, un nouveau standard de données de haut niveau conceptuel a été créé : le format STEP. Comme on peut le voir sur la Figure 4, ce standard permet l'échange de données entre tous les systèmes numériques sans utiliser de solutions « propriétaires ». Ce format permet donc d'avoir une complète interopérabilité entre tous les acteurs de la chaîne numérique. De nombreux travaux de recherches sont donc en cours pour rendre opérationnel ce format. Les avancées les plus significatives ont eu lieu au niveau de l'usinage, mais le STEP n'est pas encore complètement opérationnel. Une étude bibliographique détaillée qui présentera en détail ce standard et présentera les travaux de recherche effectués sur le sujet sera faite dans le chapitre 2 de ce manuscrit.

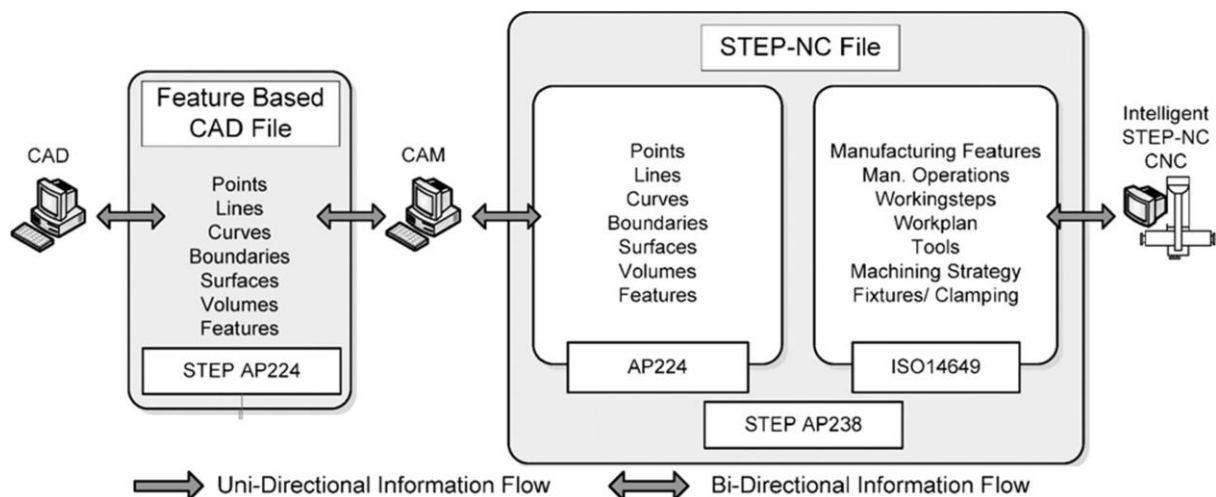


Figure 4 : Chaîne numérique avec le format STEP-NC [NEW08]

Il est donc important aujourd'hui pour les procédés de fabrication additive de profiter de cet élan international autour du format STEP, pour faire une proposition d'intégration de ces procédés dans la norme. Cela permettra à la fabrication par ajout de matière de disposer d'une chaîne numérique interopérable et d'un standard de haut niveau conceptuel ayant les mêmes performances que l'usinage, ce qui favorisera son développement.

2.4 Conclusion

Pour résumer, les enjeux au niveau de la chaîne numérique sont donc aujourd'hui :

- Le développement de solutions « ouvertes » où tous les systèmes numériques peuvent facilement communiquer les uns avec les autres.
- L'intégration de solutions de simulation et/ou d'optimisation.
- Une interopérabilité de la chaîne numérique.
- La non multiplication des fichiers dans un projet de fabrication, pour permettre une meilleure organisation du projet.
- L'utilisation d'un standard de haut niveau conceptuel qui permette de garder l'intégrité des données dans toute la chaîne numérique.

Il est donc aujourd'hui important que tout projet de fabrication se déroule dans ces conditions. Un procédé ou une solution numérique qui ne répondrait pas à ces objectifs verrait son développement freiné et ne pourrait pas trouver toute sa place dans le paysage industriel moderne.

Nous verrons donc dans les deux prochaines parties de ce chapitre, le contexte général des procédés de fabrication additive, puis nous montrerons les limites de leur chaîne numérique.

3. Les procédés par ajout de matière

3.1 Définition

A l'origine, les procédés de fabrication par ajout de matière étaient utilisés à des fins de prototypage rapide. La notion de « prototypage rapide » signifie littéralement « fabrication rapide de modèles et prototypes » et désigne différents procédés permettant de restituer physiquement des objets 3D, décrits par leurs données CAO, sans outillage et dans un temps beaucoup plus court que par les techniques classiques [TAI98]. Avec l'évolution des domaines d'application du « prototypage rapide » cette définition peut désormais s'étendre à tous les procédés de fabrication additive. La fabrication de pièces avec ces procédés se fait par ajout de matière soit point à point soit couche par couche, contrairement aux procédés d'usinage où la matière est enlevée directement d'un brut.

Le point d'entrée pour obtenir une fabrication additive est un modèle 3D réalisé avec un logiciel de CAO. Le format d'échange entre le logiciel de CAO et le couple FAO / directeur de commande numérique développé par les fabricants de machines de fabrication additive est le STL. A partir de ce modèle l'étape suivante est le choix de la direction de fabrication et de différents paramètres de fabrication, puis le modèle est décomposé en tranches. La dernière étape est la fabrication de la pièce couche par couche. Pour obtenir le produit final différentes opérations de finition (en usinage ou autres procédés) peuvent être nécessaires. La description plus en détail de la chaîne numérique actuellement en vigueur pour les procédés de fabrication par ajout de matière sera réalisée dans la suite de ce chapitre.

Les prémices de la fabrication par ajout de matière apparaissent à la fin du XIX^{ème} siècle, lorsque J.E. Blather réalise des cartes topographiques en relief en empilant des plaques de cire les unes sur les autres [BLA92]. Cette technique permet l'obtention directe d'une carte en trois dimensions mais aussi, en réalisant une forme positive et une forme négative de la carte, l'obtention d'un outillage. Il suffit alors de glisser une feuille entre les deux plaques (qui correspondent alors aux empreintes de l'outillage) pour réaliser une carte 3D. Par la suite, les améliorations seront apportées au niveau des matériaux : carton en 1940 [PER40], matière plastique en 1964 [ZAN64]. Le procédé de Stratoconception [CIR10], créé et breveté par le CIRTES (Centre européen de prototypage et d'outillage rapide), s'inspire directement de ces méthodes.

Depuis, la mise au point du procédé de Stéréolithographie (1986), bon nombre de procédés par ajout de matière ont été développés, certains de ces procédés ayant été rapidement abandonnés d'autres étant toujours utilisés. Le Tableau 1 résume toutes les techniques de fabrication par ajout de matière qui existe actuellement.

Nom	Matériau	Principe	Année de développement	Fabricants machines
Stéréolithographie (SLA)	Résine époxy ou acrylate	Sous l'action d'un laser une résine liquide photosensible est polymérisée	1986-1988	3D system (USA)
Dépôt de fil fondu (FDM)	ABS, PC	Une buse se déplace en trois axes et dépose un fil en fusion qui se solidifie au contact de la section précédente	1988-1991	Stratasys (USA)
Lamination (LOM)	Papier, composites	Les couches de matériaux thermocollants découpées par un laser s'empilent automatiquement	1985-1991	Cubic technologies (USA)
Stratoconception	Tous les matériaux en plaques usinables	Les couches sont découpées par usinage ou découpe laser à partir de matériaux en plaques puis assemblées	1990-1992	Stratoconcept (France)
Impression 3D (3DP)	Cire, thermoplastiques, métal, céramique, colle	Des gouttes de matériaux sont déposées par une buse comme une imprimante jet d'encre 2D	1985-1997	Z-Corp (USA)
Frittage laser de poudre (SLS)	Métal, thermoplastiques	Le faisceau émis par le laser est projeté à la surface de la poudre qu'il vient d'agglomérer	1987-1992	EOS (Allemagne)
Faisceau d'électron	Métal	Le faisceau d'électron est projeté à la surface de la poudre qu'il vient agglomérer	1997-2005	Arcam (Suède)
Projection de poudre	Métal, céramique	Une buse se déplace en 5 axes et vient déposer la poudre métallique qui est fusionnée par un laser	1998-2003	Optomec (USA)

Tableau 1 : Principaux procédés de fabrication par ajout de matière [WOH10] [VER09]

Pour la réalisation de pièces fonctionnelles par les procédés de fabrication additive, deux principes différents peuvent être distingués : la fabrication lit de poudre et la fabrication par projection de poudre. Dans le cas du premier principe, lit de poudre, présenté sur la Figure 5, une couche de poudre est déposée sur un plateau à l'aide d'un racleur (étape 1). Puis la source d'énergie (un laser) se déplace et vient lier la matière aux endroits désirés (étape 2). Enfin le plateau descend d'un incrément de hauteur (étape 3) et de la poudre est à nouveau étalée sur le plateau (étape 1 de nouveau) et ainsi de suite. Toutes ces étapes sont répétées jusqu'à obtenir la pièce finale.

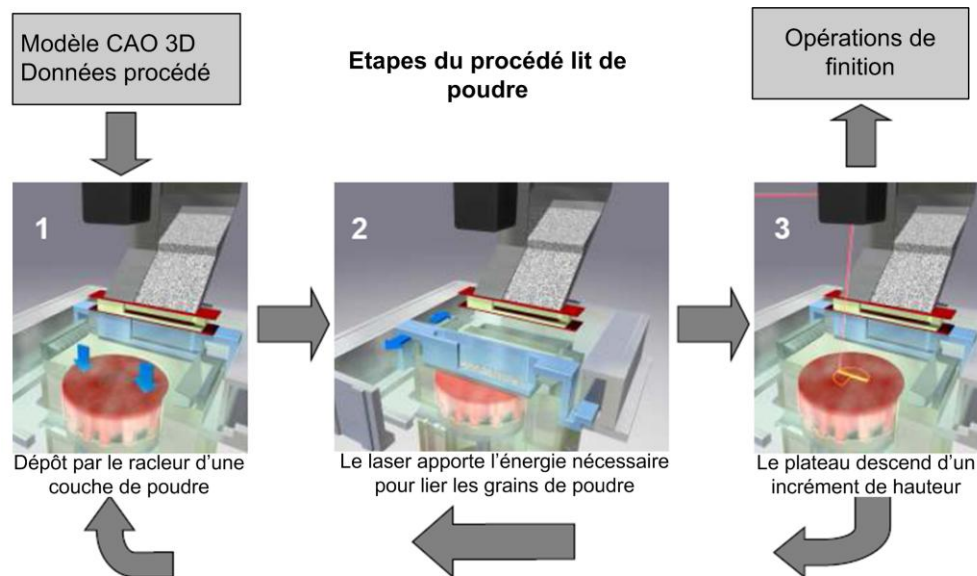


Figure 5 : Principe de la fabrication lit de poudre [NOB05]

Dans le cas de la projection de poudre, la poudre est projetée directement dans le faisceau de la source d'énergie (Figure 6). Cette technologie, plus récente, ouvre de nouvelles perspectives, notamment grâce au développement de buses de projection se déplaçant suivant 5 axes ce qui permet aujourd'hui d'améliorer la qualité des pièces produites, la réalisation de voiles minces et de pièces très complexes sans support [LEW00] [KER09a].

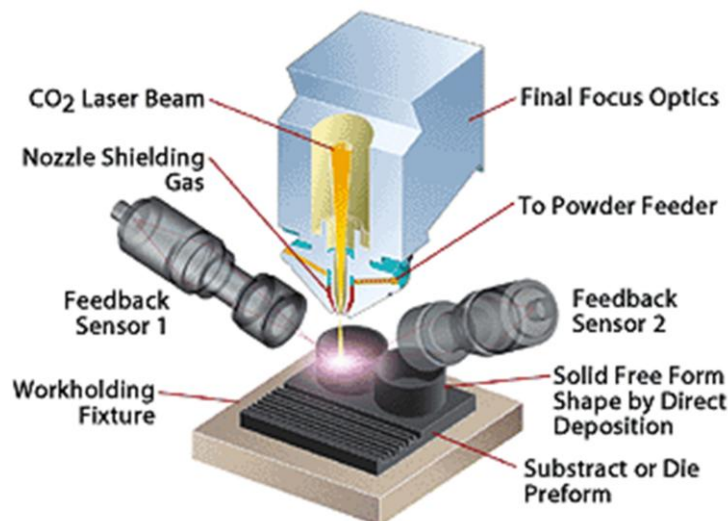


Figure 6: Principe de la fabrication par projection de poudre [NOB05]

3.2 Evolution des procédés de fabrication par ajout de matière

Les évolutions majeures ces dernières années en terme de mise au point des procédés de fabrication par ajout de matière ont été : le développement des procédés par projection de poudre et la fabrication de pièces 100% dense.

Pour les procédés par projection de poudre ceux-ci permettent désormais de réaliser la fabrication de pièces en 5 axes. A l'origine essentiellement dédié pour le rechargement de pièces [BOI07], il est maintenant développé pour la réalisation de pièces fonctionnelles, ce qui permet par rapport au procédé lit de poudre de minimiser le nombre de supports et donc la matière utilisée.

En ce qui concerne la fabrication de pièces 100% denses [KRU04] [KRU07], les progrès réalisés au niveau des sources laser permettent désormais de faire fusionner n'importe quelle poudre sans faire appel à un liant à point de fusion plus bas. Cela permet donc maintenant de fabriquer des pièces avec des caractéristiques mécaniques proches de celles obtenues pour des pièces usinées. Ces progrès ouvrent aussi la voie à la réalisation de pièces multimatériaux [PEI00] [YAK05].

3.3 Domaines d'application des procédés de fabrication par ajout de matière

Les procédés de fabrication par ajout de matière restent des procédés bien adaptés à la réalisation de pièces à formes complexes unitaires ou de petites séries. C'est ainsi que les domaines d'application les plus consommateurs de pièces réalisées en fabrication par ajout de matière sont : les produits électroniques, l'automobile ou le médical. Sur les deux graphiques des Figure 7 et Figure 8, un éventail des secteurs d'activité et domaines d'application utilisant des pièces réalisées en fabrication additive est décrit. Ces deux graphiques sont issus du livre édité par T. Wohlers (ici le *Wohlers report 2010*) annuellement qui réalise une analyse complète de la situation internationale de la fabrication par ajout de matière.

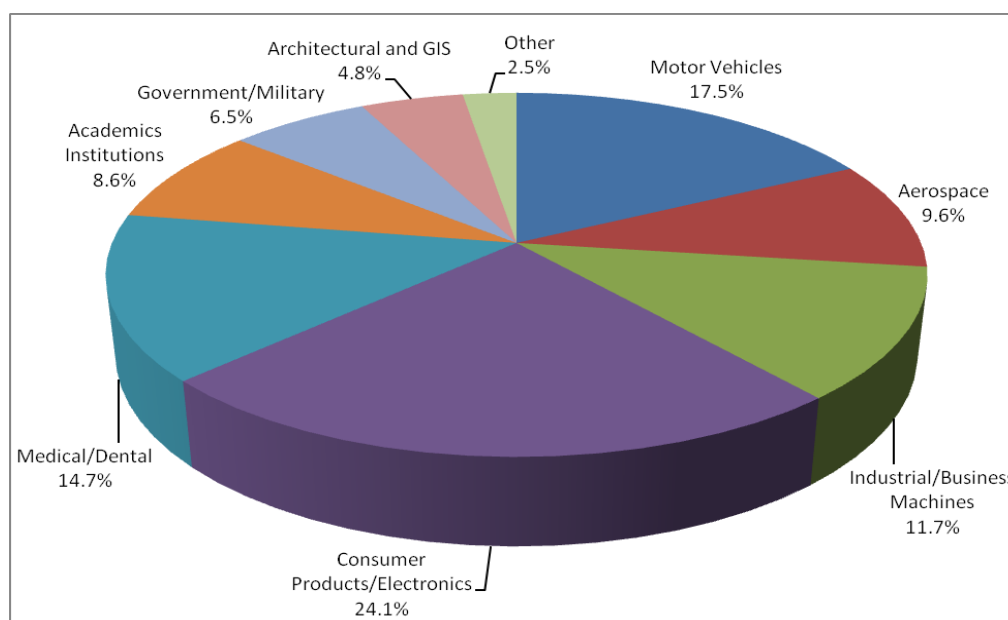


Figure 7 : Secteurs utilisant des pièces réalisées en fabrication additive [WOH10]

L'analyse sur la durée de ces données permet de constater que si la réalisation de pièces en fabrication par ajout de matière à travers le monde est en perpétuelle

augmentation ces dernières années, la répartition par secteurs d'activité reste à peu de chose près la même.

En ce qui concerne les domaines d'application des pièces réalisées en fabrication additive, une mutation importante depuis le début des années 2000 peut être soulignée, avec l'augmentation de la fabrication directe de pièces fonctionnelles, même si ce chiffre progresse moins rapidement depuis 2007 (+20% entre 2006 et 2007, chiffre multiplié par trois depuis 2002). Ces chiffres s'expliquent par l'augmentation des performances des procédés de fabrication additive, les progrès dans la fabrication de pièces 100% dense et le développement de nouvelles poudres. De plus, un changement dans les mentalités est en train de s'opérer et les procédés de fabrication additive ne sont plus uniquement cantonnés à la fabrication de prototypes.

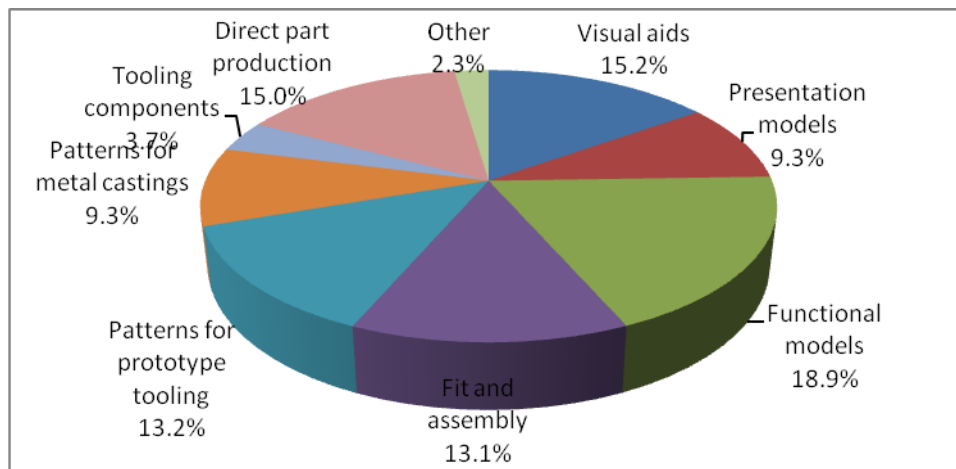


Figure 8 : Domaines d'application des pièces réalisées en fabrication additive [WOH10]

3.4 Les procédés de fabrication par ajout de matière, des procédés aujourd'hui matures et concurrentiels

Les progrès accomplis par les procédés de fabrication additive ont été considérables ces dernières années. Les principaux progrès techniques réalisés l'ont été au niveau [KRU98] [KOC99] :

- De la vitesse de fabrication.
- De l'état de surface de pièces fabriquées.
- Du nombre de matériaux et de la qualité des matériaux obtenus.
- Des caractéristiques mécaniques des pièces réalisées.

Toutes ces avancées scientifiques et le développement de nouvelles machines à moyen terme permettent maintenant de réaliser des pièces « vraie » matière [KRU03] [KRU04] et des pièces multimatériaux [PEI00] [YAK05]. La simulation de ces procédés de fabrication est aussi actuellement en plein essor avec différents travaux sur la modélisation des matériaux [CHE07] [CHO05] ou des procédés de fabrication additive eux-mêmes [HU03] [CHO03] [CHO04] [CHO05] [ROB07].

Toutes ces évolutions au niveau de la recherche et du développement des procédés de fabrication par ajout de matière permettent aujourd'hui de dire que ces procédés sont des procédés matures. G. Levy [LEV03] a démontré après une étude réalisée sur un panel de

procédés (électroérosion à fil, à électrode, usinage grande vitesse, découpe laser, procédés par ajout de matière) que l'évolution des procédés de fabrication suivait un développement usuel (Figure 9). Les analyses du marché et des besoins de la fabrication additive tendent à démontrer que nous sommes actuellement dans la phase de développement et de modification pour ce qui concerne les procédés de fabrication additive.

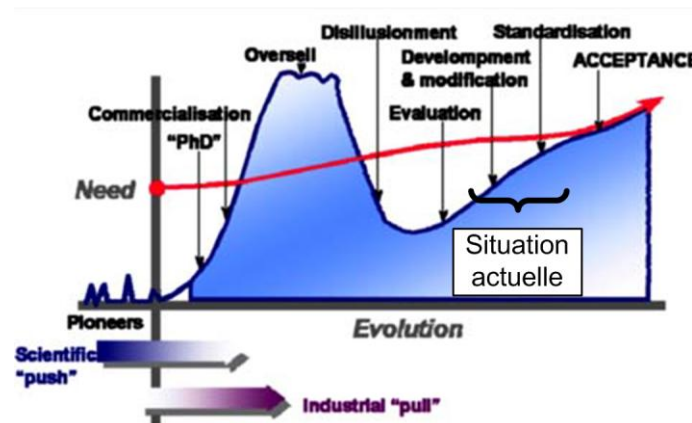


Figure 9 : Évolution du cycle de développement d'une technologie [LEV03]

La prochaine étape, désormais, est la standardisation de ces procédés. Plusieurs organismes de recherche, dont notre équipe, mettent en avant depuis quelques temps ce besoin de standardisation pour accroître encore son développement et sa reconnaissance [DAN08] [BON08] [BON09] [LEV09] [STU09] [VOL09] [RMP] [AST] [BON10]. La conclusion de ces différents travaux est que différents aspects des procédés de fabrication par ajout de matière doivent être standardisés :

- Les procédures d'essais.
- Les aspects procédés.
- Les aspects matériaux.
- La conception pour la fabrication additive.
- Les terminologies utilisées.
- L'environnement numérique de ces procédés.

Cela a débouché sur la constitution de plusieurs comités scientifiques à travers le monde qui travaillent sur les six points évoqués précédemment. Les premiers résultats sont apparus récemment sur deux points : l'aspect standardisation de la terminologie et l'aspect environnement numérique. Ainsi pour la terminologie, vingt cinq définitions de termes utilisés par la communauté de la fabrication additive sont parues. La plus importante est le choix du nom anglais de la fabrication par ajout de matière qui est désormais appelé Additive Manufacturing et ce qui évite la multiplication des noms tels que : Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing, Layered Manufacturing... L'autre point en cours de développement est la standardisation de l'environnement numérique des procédés par ajout de matière. C'est à ce niveau que nous intervenons dans le cadre des comités ISO TC184/SC1 et SC4, avec différentes présentations de J.-Y. Hascoët et M. Rauch [HAS06a] [HAS06b] [HAS08] [RAU09a]. On peut noter aussi dans ce domaine les actions de B. Stucker [STU09] et H. Lipson de l'ASTM F42 committee, qui ont entrepris une action pour proposer le format

numérique de demain pour la fabrication additive (STL 2.0). Il a ainsi envoyé aux principaux acteurs de la fabrication additive (universitaires, industriels, fabricants de machines...) un questionnaire pour connaître leurs attentes vis-à-vis d'un nouveau format. Les premiers résultats de ce questionnaire ont été synthétisés et les principales attentes des utilisateurs sont les suivantes **[LIP09]** :

- Avoir un format simple.
- Permettre une interopérabilité entre les différentes machines.
- Limitation à un seul modèle numérique.
- Etre un format stable et robuste.
- Contenir des informations volumiques.
- Etre un format qui conserve les informations géométriques.
- Contenir des informations sur les tolérances.
- Pouvoir décrire des pièces multimatériaux.

Toute proposition de nouveau format standard pour la fabrication additive devra donc répondre aux attentes exprimées ci-dessus.

En ce qui concerne la réalisation de pièces métalliques par les procédés de fabrication additive, un certain nombre de verrous scientifiques et techniques restent à lever. Tout d'abord les caractéristiques géométriques, dimensionnelles ou d'état de surface restent faibles par rapport à ce qui peut être obtenu avec des procédés par enlèvement de matière **[LEV03]**. Par ailleurs un autre frein pour l'expansion de ces procédés demeure le prix des machines qui reste très élevé par rapport à des machines d'autres procédés de fabrication.

Différentes études réalisées par Lewis et al. **[LEW00]**, à l'Université de Missouri-Rolla **[RUA06]** et par Costa Santos et al. **[COS06]** se sont intéressées aux capacités de différents procédés de fabrication par ajout de matière de pièces métalliques. Par ailleurs, d'autres études, par des expérimentations sur des pièces test, ont mis au jour les caractéristiques de précision et d'état de surface des pièces en fonction de la géométrie fabriquée, que celles-ci soient réalisées directement par fabrication additive **[KRU04]** **[RAG07]**, ou qu'il s'agisse de pièces métalliques obtenues avec des moules réalisés par des procédés de fabrication par ajout de matière **[HON03]**. Au sein de notre équipe de recherche, des études expérimentales encadrées par P. Mognol et J.-Y. Hascoët ont mis en avant que la précision dimensionnelle des pièces réalisées par fabrication additive dépendait fortement de la géométrie souhaitée **[PES08]**.

D'autres études initiées et encadrées par P. Mognol et J.-Y. Hascoët montrent la nécessité d'utiliser les procédés de fabrication par ajout de matière uniquement pour les formes et surfaces adaptées à ces procédés. O. Kerbrat et M. Rivette proposent ainsi la réalisation d'outillages hybrides modulaires, alliant des procédés de fabrication additive et des procédés d'usinage **[RIV07a]** **[RIV07b]** **[KER09b]** **[KER10]**. J. Kerninon propose lui de réaliser des pièces en fabrication par ajout de matière en utilisant des préformes réalisées par d'autres procédés d'obtention **[KER09b]**.

Pour ce qui est de la capacité des procédés lit de poudre, nous pouvons considérer pour le DMLS (Direct Metal Laser Sintering) de la société EOS, une précision de fabrication de 40 à 100 μm , et un état de surface dont la rugosité arithmétique peut atteindre 3 μm (après grenaillage de finition). Au niveau des techniques de projection de poudre, on peut classiquement s'attendre à obtenir des détails jusqu'à la dimension minimale de 0,5 mm, une

qualité de fabrication d'environ $\pm 0,125$ mm pour des pièces ayant une longueur de 25 mm, et un état de surface caractérisé par une rugosité arithmétique de l'ordre de 5 à 7 μm , selon des données pour le procédé LENS (Laser Engineered Net Shaping) d'Optomec [WOH10].

3.5 Conclusion

Les procédés de fabrication par ajout de matière, bien que ne permettant pas encore d'obtenir une qualité aussi satisfaisante, que pour les procédés plus traditionnels comme l'usinage, sont aujourd'hui attractifs pour la réalisation de pièces unitaires ou de petites séries ayant des formes complexes qui seraient très coûteuses voire impossibles à fabriquer en usinage. Mais, pour voir ces procédés encore gagner des parts de marché, il faut maintenant développer leur standardisation. L'un des aspects importants de la standardisation est le développement d'une chaîne numérique performante, ce sont les travaux qui vont être présentés dans la suite de ce document.

4. La chaîne numérique en fabrication par ajout de matière

4.1 Contexte

Comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe 2 de ce chapitre, la chaîne numérique est devenue un enjeu de plus en plus important dans l'industrie manufacturière. Comme tous les procédés de fabrication, la fabrication additive n'échappe pas à ce principe et doit donc avoir une chaîne numérique performante pour pouvoir se développer et gagner des parts de marché sur les autres procédés. Malheureusement, s'il est bien un domaine dans lequel ces procédés accusent un retard important vis-à-vis de ses concurrents c'est au niveau de son environnement numérique.

Si hier les procédés par ajout de matière étaient uniquement réservés à la simple maquette de visualisation (avec la réalisation de prototypes...), ils sont maintenant utilisés pour réaliser des pièces fonctionnelles. La chaîne numérique actuelle qui pouvait donc encore être suffisante pour la réalisation de prototypes ne l'est plus aujourd'hui pour un procédé mature qui fabrique des pièces industrielles.

L'enjeu est donc dans un premier temps d'identifier les limites de la chaîne numérique actuelle et dans un second temps de faire la proposition d'un nouvel environnement numérique pour les procédés de fabrication additive.

4.2 Limites et manques dans la chaîne numérique

La chaîne numérique actuelle des procédés de fabrication additive n'est pas satisfaisante pour un développement rapide, car de nombreuses lacunes subsistent **[STR00] [PRA02] [RYO06] [DAN08] [BON08] [BON09] [BON10]** (voir Figure 10). En effet, celle-ci a un trop grand nombre de limites :

- Echange des données uniquement descendant.
- Discontinuité dans la chaîne CAO/FAO/DCN, avec pertes de données au niveau de chaque étape de la chaîne numérique.
- Multiplication des fichiers numériques.
- Utilisation d'un modèle approximatif pour la FAO, avec absence d'informations technologiques et de données sur les tolérances (tolérances au niveau du modèle numérique STL, ainsi que sur les tolérances dimensionnelles et géométriques).
- Solution « propriétaire » (développée par chaque fabricant de machines de fabrication additive) et non générique au niveau de la FAO et du DCN.
- « Boîte noire » au niveau du DCN ne permettant pas la mise en place facile de modules d'optimisation de la fabrication.

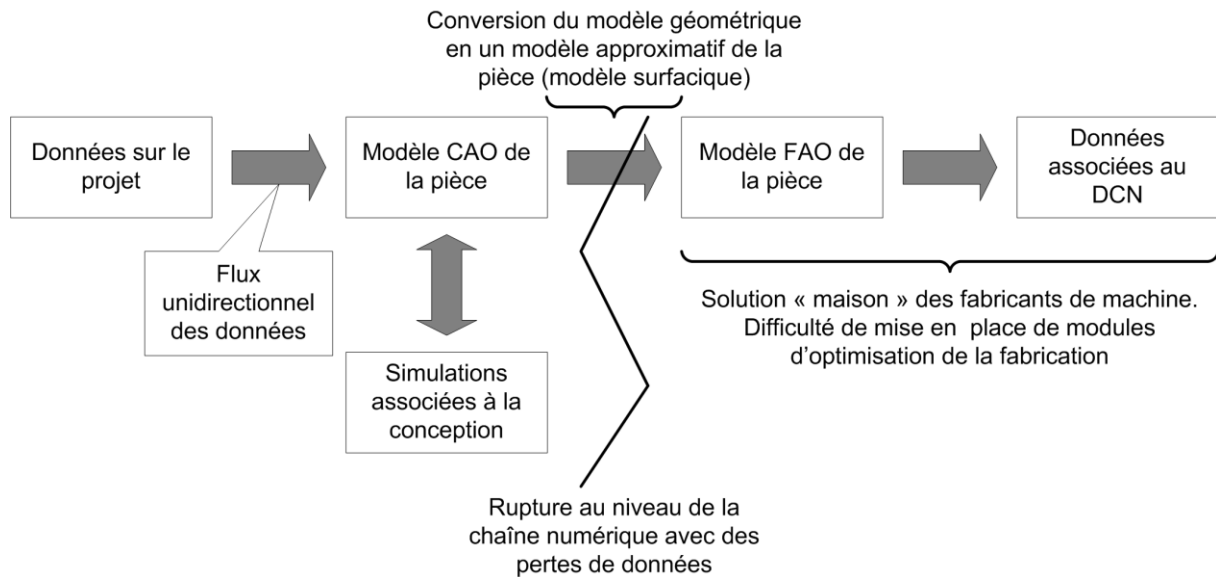


Figure 10 : Chaîne numérique actuelle en fabrication rapide

Il devient donc aujourd'hui urgent de proposer une solution CAO/FAO/DCN robuste en fabrication rapide. Notre méthodologie pour arriver à une telle solution est présentée dans la suite de ce chapitre.

4.3 Illustration des limites de la chaîne numérique actuelle

Une présentation des différentes étapes à réaliser pour la réalisation d'un projet de fabrication additive, ainsi que les limites associées, va être présentée dans la suite de ce paragraphe (voir Figure 11).

Etape 1 : Définition du projet de fabrication additive

Renseignements classiques qui sont à définir avant tous les projets de fabrication.

Etape 2 : préparation du modèle CAO et préparation du modèle STL

La première étape après la définition du projet comme pour tout projet de fabrication est la définition d'un modèle CAO, défini sur n'importe quel logiciel.

A partir du modèle CAO réalisé, le modèle STL doit être généré. Ce modèle peut être généré sur même logiciel de CAO que celui utilisé précédemment ou sur un autre logiciel. Selon les logiciels utilisés, différents paramètres peuvent ou non être réglés. La génération de ce modèle STL entraîne différents problèmes :

- Le réglage du modèle STL est le même sur toute la pièce, sans pouvoir être adapté aux spécifications ou à la complexité de fabrication de la pièce (impossibilité de réglage de l'erreur de flèche plus fin dans les zones complexes à réaliser par exemple...).
- Certaines informations du modèle CAO sont perdues lorsque le modèle STL est généré : spécifications, informations volumiques, propriétés mécaniques, informations sur le matériau...
- Des erreurs au niveau du modèle STL peuvent apparaître (triangles qui se chevauchent, surface non fermée...) ce qui implique quelques fois qu'un retraitement des trièdres est nécessaire.

Etape 3 : réparation du modèle STL

Parfois, une opération de retraitement du fichier STL est nécessaire sur un autre logiciel (type Magics), pour corriger les défauts du fichier (de trous, de chevauchement de faces...). Cette opération est manuelle et peut prendre un temps considérable, voici les principaux inconvénients de cette opération :

- Retraitement non automatique.
- Non connaissance de l'influence du retraitement sur la fabrication.
- Perte de temps.
- Retraitement dépendant de l'utilisateur.

Etape 4 : préparation de la fabrication

L'étape suivante est la génération automatique des supports nécessaires à la réalisation de la pièce sur le logiciel dédié à la machine de fabrication. Pour cela, il faut choisir la direction de fabrication, puis les supports sont générés. Le choix sur le type de géométrie des supports peut être fait. Lors de cette opération un nouveau fichier est donc créé.

A partir de notre modèle désormais composé de la pièce en elle-même et de notre modèle des supports, le modèle tranché peut maintenant être généré.

Les réglages des paramètres directement inhérents à la fabrication (puissance laser, vitesse du laser...) sont réalisés directement sur la machine elle-même, ce qui nécessite de l'immobiliser le temps de ces réglages.

Cette quatrième étape présente encore une fois plusieurs inconvénients :

- Stratégie unique pour toute la pièce, non adaptée aux spécifications et à la géométrie.
- FGM non pris en compte.
- Supports préformés impossible.
- Pas de simulation / optimisation mis en place.

Etape 5 : fabrication

La dernière étape concerne la fabrication de la pièce qui peut s'effectuer sans la présence d'un opérateur. Là encore certaines limites apparaissent :

- Pas de simulation / optimisation mis en place.
- Pas de possibilité de mise en place de suivi de fabrication.

Finalement, plusieurs défauts majeurs peuvent être mis au crédit de la chaîne numérique actuelle des procédés de fabrication additive :

- Respect de la géométrie mal assuré sur la pièce fabriquée.
- Flux des données uniquement descendant.
- Si une modification doit être opérée à un endroit de la chaîne numérique toutes les étapes suivantes doivent être ré-effectuées.
- Modifications pied de machine impossible.
- Capitalisation des données impossible.
- Plusieurs logiciels différents utilisés, multiplication des fichiers créés.
- Des solutions d'optimisation ou de simulation ne peuvent être mises en place facilement.

- La préparation de la fabrication n'est pas générique (dédiée à un seul type de machine). Il n'y a donc pas d'interopérabilité ou portabilité des données numériques.

Sur la figure suivante, les différentes étapes précédemment présentées sont illustrées, ainsi que leurs inconvénients.

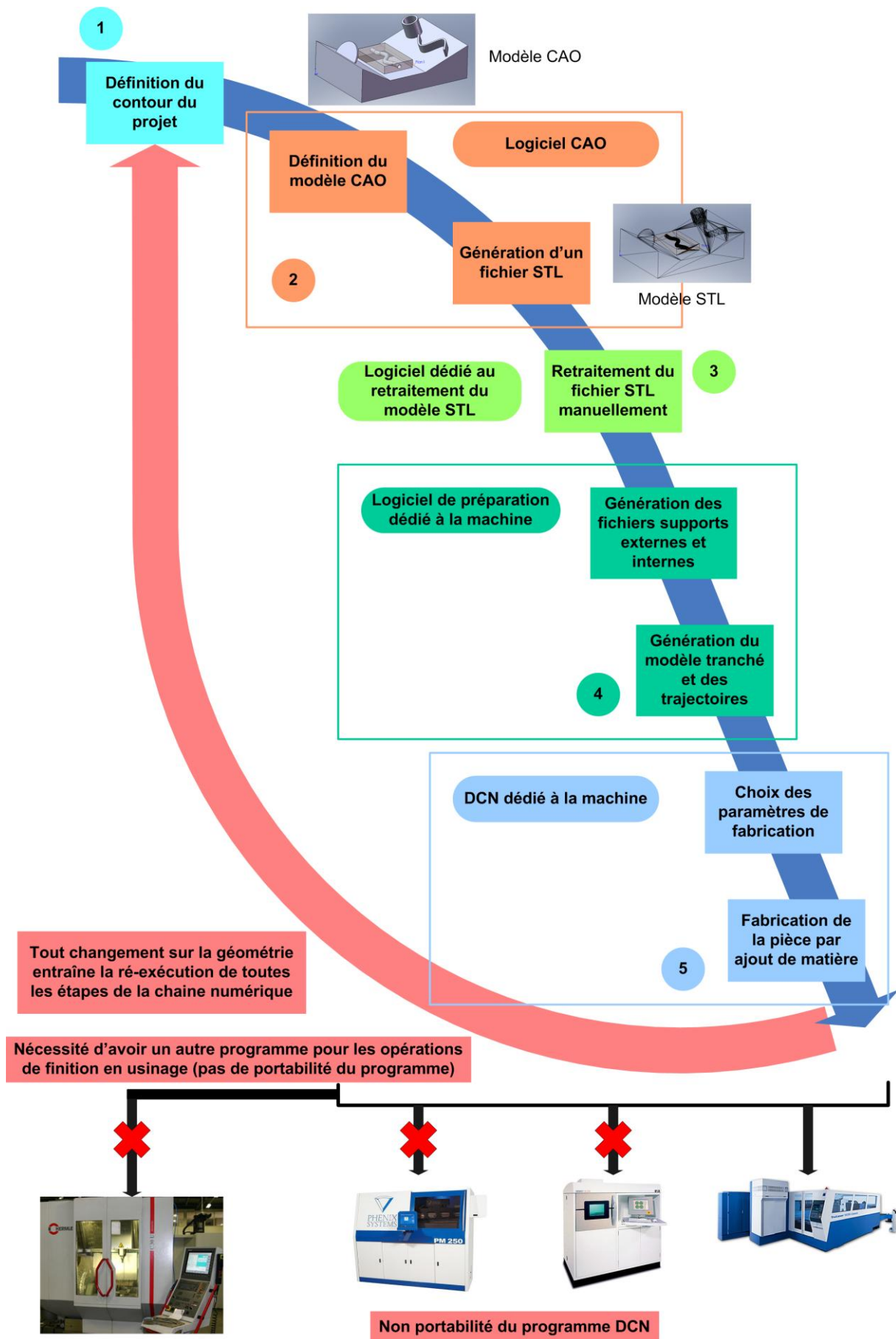


Figure 11 : Situation actuelle d'un projet de fabrication additive

4.4 Proposition d'une nouvelle chaîne numérique en fabrication additive

Comme, nous venons de l'exposer dans les deux paragraphes précédents, la chaîne numérique actuelle des procédés de fabrication par ajout de matière n'est pas satisfaisante d'un point de vue performance et respect de l'intégrité des données numériques. C'est pour cela que nous proposons une nouvelle chaîne numérique pour que les procédés de fabrication par ajout de matière deviennent plus performants, et que leur environnement numérique ne soit plus un frein pour leur développement par rapport aux autres procédés.

Pour cela nous souhaitons intégrer la chaîne numérique de la fabrication additive dans un standard de haut niveau conceptuel (voir Figure 12), qui permette la capitalisation des données de chaque élément de la chaîne numérique : données géométriques du modèle CAO, données du procédé du modèle FAO, données au niveau du DCN, données d'optimisation et simulation des logiciels associés... Ce nouveau modèle évite la multiplication des documents numériques avec l'enrichissement d'un seul et unique document numérique tout au long des étapes de la chaîne numérique, sans opération de post-traitement.

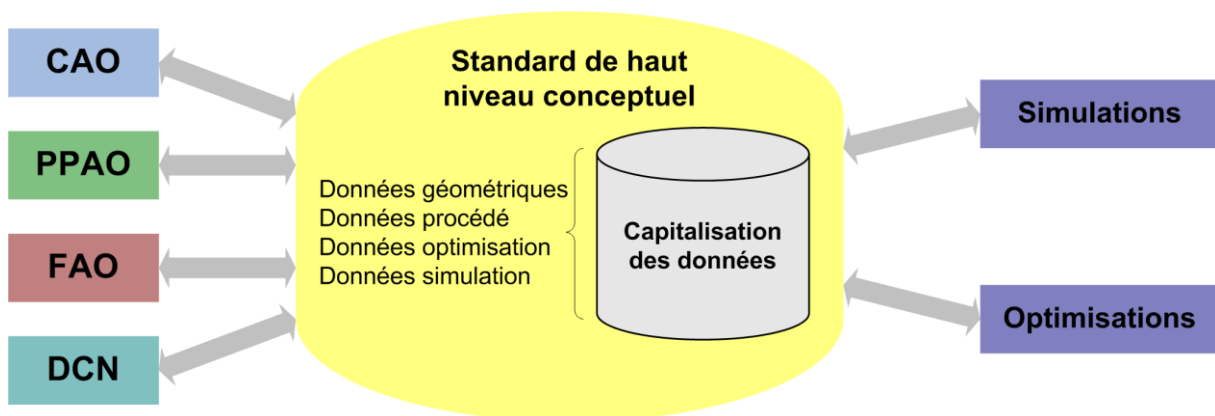


Figure 12 : Proposition de chaîne numérique pour la fabrication rapide

Nos travaux de recherche visent donc à proposer une méthodologie (présentée dans le paragraphe suivant) pour répondre à cet objectif.

4.5 Méthodologie d'introduction des procédés de fabrication par ajout de matière dans un standard de haut niveau conceptuel

L'objectif des travaux réalisés au cours de cette thèse est la proposition d'un nouveau modèle de données numériques dans un standard de haut niveau conceptuel pour les procédés de fabrication par ajout de matière.

Nous proposons une méthodologie organisée en cinq étapes pour atteindre cet objectif (Figure 13). La première étape consiste à faire une analyse exhaustive des données numériques nécessaires à la réalisation d'un projet de fabrication additive, ainsi qu'à analyser quels sont les nouveaux besoins pour avoir un projet de fabrication performant. L'étape suivante (étape 2) concerne, à partir des données collectées à la première étape, l'organisation de ces données au sein d'un modèle hiérarchisé. En parallèle (étape 3), une

étude est menée pour déterminer dans quel standard de données de haut niveau conceptuel notre nouveau modèle de données doit être développé. A partir du modèle hiérarchisé des données réalisé à l'étape 3 et du standard choisi à l'étape 2, l'introduction des données sur les procédés de fabrication additive au sein du standard choisi est réalisée (étape 4). La dernière étape (étape 5) est la validation du nouveau modèle de données par le comité ISO.

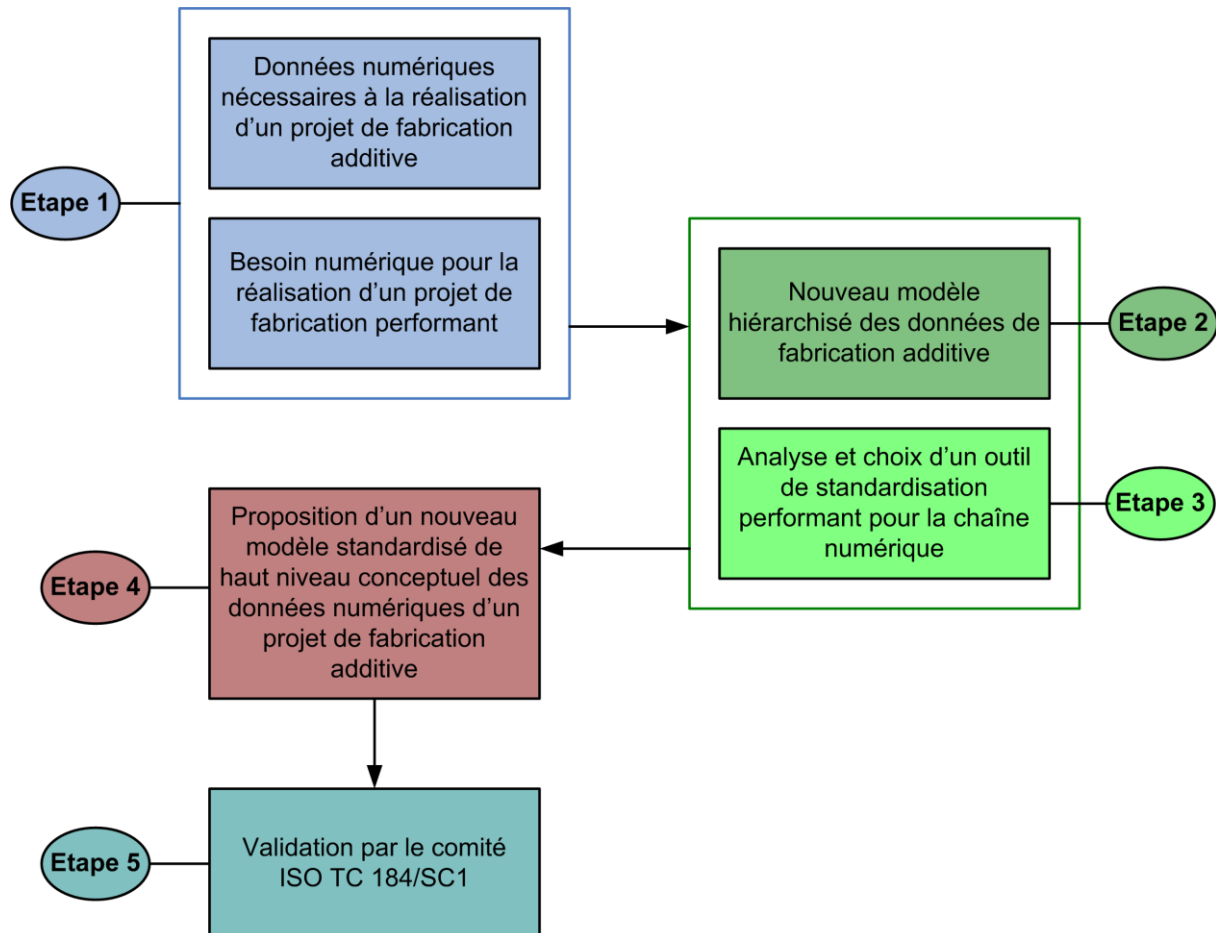


Figure 13 : Méthodologie pour l'intégration des procédés de fabrication additive dans un standard de haut niveau conceptuel

5. Synthèse sur le contexte général de l'étude et le plan du manuscrit

Ce premier chapitre a permis de faire un bilan de l'évolution et des enjeux de l'industrie manufacturière. Nous pouvons ainsi faire ressortir les grandes problématiques suivantes pour qu'un projet de fabrication se déroule correctement :

- Minimiser les coûts lors d'un projet de fabrication.
- Réduction des temps de développement et de mise au point, par l'utilisation plus systématique de simulation et d'optimisation.
- Augmenter la qualité des produits.
- Favoriser une flexibilité accrue.
- Standardiser l'environnement des procédés.

Par ailleurs nous avons aussi pu constater que les procédés de fabrication additive sont aujourd'hui des procédés qui arrivent à maturité. En effet, ils deviennent une alternative intéressante aux procédés plus traditionnels, avec la réalisation de pièces plastiques, céramiques, métalliques 100% dense ou multimatériaux, pour la réalisation de pièces à formes complexes, unitaires ou de petite série.

Cependant leur développement est aujourd'hui ralenti par l'utilisation d'une chaîne numérique pauvre en informations et non adaptée à ce challenge. L'environnement numérique des procédés de fabrication additive est donc un frein, alors que c'est aujourd'hui un enjeu majeur pour la réduction des coûts, des temps de développement, l'augmentation de la flexibilité et de la qualité. La chaîne numérique actuelle n'est donc pas en phase avec le niveau de performance des solutions CAO-FAO-DCN et logiciels de simulation / optimisation de plus en plus performants.

Nos travaux se portent donc sur la recherche de solutions pour arriver à un environnement numérique pour les procédés de fabrication additive qui soit performant. Nous avons donc développé une méthodologie dans ce but pour obtenir une chaîne numérique standardisée et performante. Les différentes étapes pour arriver à ce résultat sont développées dans les chapitres suivants.

Nous commencerons dans le **chapitre 2**, par un état de l'art sur les modèles proposés pour décrire les procédés de fabrication additive. Puis, nous nous intéresserons au standard de haut niveau conceptuel STEP, pour démontrer que ce standard a toutes les qualités requises pour être le nouveau standard pour la chaîne numérique des procédés de fabrication par ajout de matière.

Dans le **chapitre 3**, nous présenterons un nouveau modèle de description des données numériques en fabrication additive à travers un modèle hiérarchisé des données. Ce modèle servant de données d'entrée pour l'introduction de ces procédés dans la norme ISO 14649 (norme STEP-NC).

A partir de ce nouveau modèle hiérarchisé, nous présenterons dans le **chapitre 4** notre démarche ainsi qu'une méthodologie pour l'introduction de la fabrication additive dans

la norme STEP-NC. Ce chapitre sera aussi l'occasion de présenter un nouveau modèle de description des pièces de fabrication additive avec le développement de nouvelles entités de fabrication par ajout de matière.

Le **chapitre 5** permettra d'illustrer tous ces concepts avec la mise en place d'une plateforme STEP-NC sur une machine de projection de poudre 5 axes, qui permettra de valider le nouveau modèle de description de pièce en fabrication additive et montrer la viabilité de ce modèle par la réalisation d'une pièce test.

Enfin le **chapitre 6** présentera une conclusion des travaux effectués et les perspectives attendues à la suite de ces recherches.

Chapitre 2

Etat de l'art / Problématique

1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter la problématique de nos travaux de thèse. Dans le premier chapitre du manuscrit, nous avons souligné l'importance pour les procédés de fabrication d'avoir une chaîne numérique plus adaptée aux dernières évolutions de ces procédés. Nous avons également souligné les défauts de la chaîne numérique actuelle des procédés de fabrication additive et la nécessité de s'appuyer sur un standard de haut niveau conceptuel. Nous devons donc maintenant étudier les propositions qui ont déjà été faites pour remplacer le standard de données existant afin d'identifier les verrous qui restent à lever dans ce domaine.

Ainsi, nous allons présenter dans une première partie une analyse de toutes les solutions envisagées pour pallier les manques et défauts du standard utilisé actuellement en fabrication additive. Nous verrons que la plupart de ces propositions ont trouvé peu d'écho dans la communauté scientifique fabrication additive. En effet, de part la complexité des standards proposés ou une réponse partielle aux besoins des utilisateurs, ces solutions n'ont pas abouti au standard attendu de demain. Nous verrons également qu'une partie non négligeable de la communauté s'est regroupée récemment pour réfléchir à un nouveau format « STL 2.0 », et qu'une première proposition a été faite. Cette solution de notre point de vue ne répond que partiellement aux enjeux de la chaîne numérique en fabrication.

La seconde partie est consacrée à l'identification des informations nécessaires à la réalisation de projets de fabrication par ajout de matière. Pour cela, nous avons mené une étude la plus large possible, en ce qui concerne la description, la modélisation ou l'aide au choix des procédés de fabrication additive. Cette étude bibliographique nous permettra d'identifier tous les paramètres et données qui sont importants pour la définition d'un projet de fabrication additive. A partir de ces données enrichies d'autres informations nécessaires pour la réalisation d'un projet de fabrication additive, nous proposerons un modèle exhaustif et hiérarchisé des données de projets de fabrication additive (étape 2 de la méthodologie présentée au chapitre 1).

Enfin dans la troisième partie de ce chapitre, nous présenterons la norme STEP dans sa globalité. Ce paragraphe sera l'occasion de présenter l'organisation, les points forts et enjeux de la norme. A la suite de cette étude, nous présenterons plus en détail le standard STEP développé au niveau du directeur de commande numérique (STEP-NC), avec une étude bibliographique des derniers travaux réalisés sur ce standard. Cette étude nous permettra de mettre en avant l'intérêt de l'intégration de la fabrication additive dans ce standard, ce qui nous permettra dans la dernière partie d'exposer la problématique à laquelle nos travaux proposent de répondre.

2. Etat de l'art sur les propositions de nouveaux standards de données pour la fabrication additive

Nous avons mis en avant dans le chapitre précédent, les limitations de la chaîne numérique en fabrication additive liées à l'utilisation du format STL. Nous ne sommes pas les seuls à avoir identifié ces défauts et à constater qu'il était temps de penser à la proposition d'un nouveau standard de données en fabrication additive. Ainsi depuis le début des années 2000, plusieurs groupes de recherche ont fait des propositions de nouveaux formats pour la fabrication par ajout de matière. Dans la suite de cette partie, nous ferons donc une présentation des principaux travaux effectués pour remplacer le format STL, nous montrerons leurs points forts ainsi que leurs limites par rapport aux attentes placées dans la proposition d'un nouveau format.

Dans la suite de cette partie, nous verrons que deux approches ont été effectuées pour le remplacement du STL. Tout d'abord des formats de bas niveau conceptuel qui proposent de corriger uniquement quelques manques ou défauts du STL (paragraphe 2.1 à 2.6), sans vision globale du problème. Ensuite, les travaux réalisés autour de la proposition du « STL 2.0 » qui ont d'abord analysé toutes les attentes de la communauté vis-à-vis d'un nouveau standard. Puis à partir de ces attentes, ils proposent un nouveau modèle qui répond plus globalement aux enjeux de la fabrication additive.

Nous verrons ensuite que notre approche a été plus globale, avec une prise de recul pour aborder le problème de la chaîne numérique en fabrication additive dans sa globalité et pas seulement vis-à-vis de son standard de données.

2.1 Le format LMI

L'un des premiers formats proposé, comme alternative au format STL, est le format LMI [CHU97a] [CHU97b]. Ce format peut être considéré comme un format STL avancé [CHU97b]. Les redondances qui sont présentes au niveau du format STL (3 sommets des triangles définis, ainsi que la normale) sont supprimés par une restructuration. De plus, une double représentation facétisée (comme pour le STL) et B-rep est possible par l'ajout d'information topologique. Malheureusement, ce format n'est qu'un format STL « avancé » et donc par la même occasion ne permet pas de pallier les principales limitations du STL mis en avant au chapitre précédent.

2.2 Le format VRML

Un autre format qui a été développé, au début des années 2000, est le format VRML (Virtual Reality Modeling Language) [MIN02]. Ce format, qui contient des informations de couleur et texture sur les surfaces, peut représenter des géométries complexes et ne présente pas de redondances dans les informations. Mais comme le montre [DAN08], au regard de la complexité de ce format, il n'est pas optimisé pour les procédés de fabrication additive. De plus, il permet uniquement de représenter des surfaces et pas des corps volumiques. Cela ne permet donc pas d'avoir des informations sur le matériau de la pièce à

réaliser, ni sur ses spécifications fonctionnelles. En conclusion, ce format est adapté pour générer des prototypes colorés, mais pas pour réaliser des pièces mécaniques fonctionnelles.

2.3 Le format CS File

Zhang et al. [ZHA03] proposent eux, un nouveau format d'échange, entre le modèle CAO et les systèmes de fabrication additive, appelé CS File. Ce fichier a l'avantage par rapport au STL d'être beaucoup moins gourmand en mémoire (taille de fichier divisée par quatre par rapport au STL) et de garder toutes les informations du modèle CAO. Mais ce format a tout de même des inconvénients, il ne peut pas par exemple contenir des informations sur les procédés, ne permet pas de décrire des pièces multi-matériaux, permet un échange de données uniquement du modèle CAO vers le système de fabrication additive...

2.4 Le format PLY

Un autre format, proposé à l'université de Stanford, est le PLY format (Polygon File Format). Ce format développé à l'origine pour l'échange d'objet 3D obtenu par scanning, décrit des pièces à l'aide de points, surfaces stockées avec des propriétés comme : informations de couleur, normale à la surface, transparence, texture... Cette structure ressemble à la structure des fichiers VRML. Si ce format pouvait paraître satisfaisant, l'absence de données sur la fabrication et les opérations de post-processing importantes n'en font pas un format satisfaisant.

2.5 Le format ETL

Un format toujours en cours de développement est le format ETL [WAN06] [WAN07]. Dans ce modèle, l'approche s'est focalisée sur l'amélioration des représentations géométriques et un tranchage simplifié. Ce format est composé de deux parties : un fichier pour le modèle géométrique (GDF : Geometry Description File) et un autre fichier qui décrit les détails des surfaces comme la couleur ou la texture (TDMF : Texture Mapping Description File). Mais ce modèle n'offre pas de description satisfaisante sur les informations du procédé et d'autre part ne réduit pas la taille des fichiers par rapport au STL (avec l'emploi de deux fichiers).

2.6 Autres formats proposés

Bien d'autres formats extensions du STL [WU06] ont tenté de se substituer au STL pour devenir le format de référence des procédés par ajout de matière mais comme montré dans de nombreuses études [JUR99] [STR00] [PAT02] [PRA02] [DAN08] aucun n'est complètement satisfaisant en terme d'informations aussi bien géométriques que concernant le process de fabrication.

Cela a conduit ces dernières années à une réflexion pour la proposition du standard de données de demain pour la fabrication additive. Ainsi, deux principales directions sont explorées à l'heure actuelle : nos travaux qui proposent l'intégration des procédés de fabrication additive dans un standard de haut niveau conceptuel (le STEP-NC) et des travaux initiés par un comité international pour la standardisation des procédés de fabrication qui propose le « STL 2.0 ». Les travaux réalisés dans ce cadre sont développés dans le paragraphe suivant.

2.7 Proposition récente d'un nouveau format STL 2.0

Récemment un comité international dirigé par B. Stucker, l'ASTM F42 committee, a vu le jour pour la standardisation des procédés de fabrication additive. Dans ce comité l'une des thématiques s'intéresse au remplacement du STL et la proposition d'un nouveau standard « STL 2.0 » [STU09]. Les premiers travaux de ce comité ont conduit à la proposition d'un nouveau format appelé AMF (Additive Manufacturing File) [HIL09]. Ce nouveau format pour la fabrication additive s'appuie sur le format standard XML. Cette proposition est partie du constat, que le format STL n'est plus adapté au procédé de fabrication additive aux vues de leur évolution ces dernières années, avec notamment la possibilité de fabrication multi-matériaux [HIL09]. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, une consultation de tous les acteurs de la communauté de la fabrication par ajout de matière (industriels, fabricants de machines, universitaires...) a été lancée pour savoir quelles étaient les attentes vis-à-vis d'un tel format. Les résultats que nous avons évoqués dans le premier chapitre ont donc été synthétisés par Lipson [LIP09]. Cela a débouché sur la proposition de développement d'un standard basé sur le format XML, qui répond à ces attentes.

Ce format est basé sur une représentation basée entités, à chaque entité est associé un paramètre géométrique, du matériau ou du procédé. Ensuite, il y a des relations de hiérarchisation entre les différentes classes et sous-classes d'entités. Un exemple de description d'une pièce avec ce format est présent sur la Figure 14.

```
<?xml version="1.0"?>
<AMF>
  <Palette>
    <Material MaterialID = "0">
      <Name>StiffMaterial</Name>
    </Material>
    <Material MaterialID = "1">
      <Name>FlexibleMaterial</Name>
    </Material>
    <Material MaterialID = "2">
      <Name>GradientMaterial</Name>
      <Equation UseMaterialID = "0">0.30*X</Equation>
      <Equation UseMaterialID = "1">0.30*(1-X)</Equation>
    </Material>
  </Palette>

  <Object PrintID = "0" units = "mm">
    ...
  </Object>
</AMF>
```

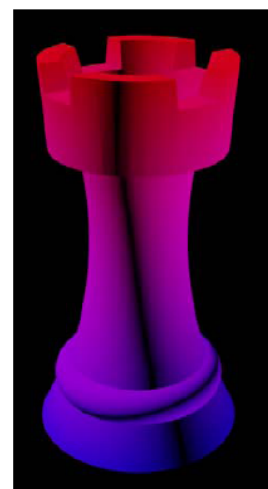


Figure 14 : Exemple de description d'une pièce multi-matériaux (FGM) avec le nouveau format AMF

Ce format qui se base sur le langage de programmation XML basé entités et open source est intéressant car il permet à toute personne contribuant au développement des procédés de fabrication additive d'enrichir le modèle avec de nouvelles entités sans rendre obsolète la version précédente. L'inconvénient de ce type de contribution est que cela peut conduire à un modèle trop fourni avec des redondances qui peuvent entraîner des problèmes de compréhension.

Les principaux apports de ce format sont définis par les membres de l'ASTM F42 committee [HIL09] [LIP09] :

- C'est un format simple.
- C'est un format flexible.
- C'est un format extensible.
- C'est un format complètement affranchi de toute solution propriétaire.
- C'est un format basé sur des entités, de nouvelles entités peuvent donc être ajoutées facilement sans remettre en cause les versions précédentes.
- Il permet la description de pièces réalisées en multi-matériaux (FGM par exemple).
- Il est facile à comprendre et lisible par l'homme.
- C'est un format open source qui permet à chacun d'apporter sa contribution au modèle.

Ce format se veut être une alternative au format STL, et le format pour la fabrication additive à l'avenir. Il bénéficie d'un élan international important et beaucoup d'espoirs sont fondés autour de son développement. Cependant plusieurs aspects ne sont pas abordés ou développés avec l'AMF :

- Le problème d'interopérabilité entre les logiciels de CFAO d'un côté et le DCN ne sont pas résolus.
- Ce format s'intéresse, pour l'instant, à résoudre principalement les problèmes liés à la fabrication multi-matériaux (FGM).
- Toute la structure de ce standard doit être développée pour la fabrication additive.
- Aucune expérience n'est disponible autour de ce format pour la fabrication (aucun autre procédé de fabrication n'utilise ce format), ce qui peut marginaliser la communauté.
- Les possibilités de fabrication multi-process ne sont pas abordées.

Les travaux pour la proposition du « STL 2.0 » sont des travaux intéressants, notamment avec une approche programmation basée entités (avec le format XML) qui permet d'avoir un modèle rapidement opérationnel et évolutif. De plus, le fait pour ce format d'être open source ne peut que favoriser sa propagation. En effet, cela le rend indépendant de toute solution propriétaire, permet à toute la communauté de participer à son développement et son coût nul ne peut pas freiner les utilisateurs.

Cependant, de notre point de vue cette approche ne prend pas assez de recul au niveau de la chaîne numérique dans sa globalité, avec une approche uniquement point de vue standard de données. Notre approche se veut elle plus globale avec une prise en considération de toute la chaîne numérique en fabrication additive. Cela débouche donc sur une stratégie différente pour la proposition de standard de haut niveau conceptuel pour la fabrication par ajout de matière, basée dans notre cas sur le standard STEP-NC.

2.8 Conclusion

Le format standard STL qui a servi de format de référence pour le prototypage, n'est plus aujourd'hui en adéquation avec les procédés de fabrication par ajout de matière qui ont significativement évolués. Celui-ci n'est plus capable de traiter bon nombre de problématiques qui sont pourtant courantes pour la fabrication additive : fabrication FGM, nécessités d'avoir des informations volumiques et/ou surfaciques...

Depuis, un dizaine d'années plusieurs membres de la communauté scientifique se sont donc penchés sur la proposition d'un successeur à ce format. Malheureusement bon nombre de ces propositions se sont avérées être des échecs. En effet, certaines propositions ne proposaient de ne résoudre qu'une partie des problèmes sans adopter une vision globale, d'autres se sont au final avérées être beaucoup trop compliquées à utiliser et/ou mettre en place.

Récemment une partie non négligeable de la communauté, sous l'égide d'un comité de l'ASTM F42, a soulevé ces problèmes et veut arriver à la proposition du STL 2.0, un standard qui soit bien adapté aux procédés de fabrication additive actuels, et qui soit adopté rapidement par toute la communauté. Comme nous l'avons vu, si ce format semble être intéressant un certain nombre d'interrogations subsistent quant à la réponse à tous les problèmes. De plus, ce format est uniquement développé pour les procédés de fabrication additive et risque donc de marginaliser ces procédés.

Notre approche a donc été différente, en menant une étude sur les standards déjà proposés et utilisés par d'autres procédés de fabrication. Cela nous a conduit à regarder quels formats existent en fabrication et lesquels apportent des réponses intéressantes au niveau de la chaîne numérique. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, le format STEP répond à plusieurs de ces réponses. Nous présenterons donc dans la suite de chapitre la norme STEP dans sa globalité et le standard STEP-NC plus particulièrement, ce qui nous permettra de mettre en évidence que ce standard peut être un standard intéressant pour la fabrication additive.

Par ailleurs, pour avoir une vision complète des besoins des procédés de fabrication additive en termes de données (sur la pièce, le process, ...), de capacité de fabrication (FGM, fabrication sur support, ...), de besoins numériques, nous proposerons dans le chapitre 3 un nouveau modèle complet pour ces procédés. Pour être le plus exhaustif possible dans la proposition de notre modèle, nous allons donc faire un état de l'art de toutes les descriptions, structurations, aides au choix ou autres modèles qui ont été développés sur ces procédés. Cette étude a pour but d'identifier les structurations et les informations qu'il est nécessaire d'intégrer dans un nouveau modèle complet de description des procédés de fabrication par ajout de matière.

3. Etat de l'art des modèles de description des procédés existants de fabrication additive

Dans la partie précédente de ce chapitre, nous venons de voir les différentes propositions de la communauté internationale pour le remplacement du format STL. Cette étude nous a permis de voir qu'hormis les travaux autour du développement du « STL 2.0 » la plupart des travaux n'ont pas débouché sur un standard adopté par tous et sont restés marginaux. On peut expliquer cela par une vision trop restrictive de l'identification des besoins pour la proposition d'un nouveau modèle. Ceux-ci n'ont, en effet, répondu qu'à certains problèmes spécifiques liés à l'utilisation du STL et n'ont pas cherché à proposer une solution qui répondraient à tous les enjeux de la fabrication additive.

Pour répondre à ces enjeux et identifier tous les besoins de la communauté vis-à-vis d'un nouveau standard de données, nous proposons dans cette partie de réaliser un état de l'art sur les différentes études menées ces dernières années sur la description, la structuration, la modélisation, l'aide au choix, l'identification des nouveaux besoins... en fabrication additive. Ceci de manière à identifier toutes les informations et caractéristiques importantes qui devront être intégrées dans le nouveau modèle complet de description des procédés de fabrication par ajout de matière, cette étape précédant la proposition d'un nouveau standard de données (étape 2 de la méthodologie proposée au chapitre 1).

Depuis le début des années 90 et l'émergence des procédés de fabrication additive, de nombreux travaux de recherche se sont intéressés à la description, à la structuration, à la modélisation, ou à l'aide au choix des procédés de fabrication additive. Ces différentes études ont eu une approche plus ou moins complète, certaines s'intéressant aux procédés dans leur ensemble, d'autres s'intéressant uniquement à certains aspects particuliers (matériaux, machines, ...) de ces procédés. Nous ferons l'étude de toutes ces approches dans la suite de cette partie.

3.1 Les modèles de description complets

Nous appelons modèles de description complet, les modèles ayant eu une approche exhaustive de la description des procédés de fabrication par ajout de matière. Ce sont des modèles qui ont eu une vision large en décrivant aussi bien les aspects géométriques, que les données sur les procédés ou la gestion des données numériques...

Il existe peu d'études dans la littérature qui ont proposé une modélisation complète des procédés de fabrication par ajout de matière. Un groupe de recherche de l'université de Singapour [CHU98] relate que le développement des procédés de fabrication additive peut être décomposé en quatre principales parties (voir Figure 15) : la technologie de fabrication, les données numériques, le matériau transformé et les domaines d'application. L'étude réalisée ici montre les grands axes de développement d'un nouveau modèle de données, mais ne va pas jusqu'à proposer un modèle complet et détaillé pour la fabrication additive. Par ailleurs, plusieurs aspects manquent quant à la description complète d'un projet de fabrication additive : les aspects caractéristiques mécaniques, géométriques, réglages des paramètres de fabrication ou encore les traitements post-production ne sont pas abordés. Un

autre point faible de cette approche est la non proposition d'intégration de ce modèle dans un système numérique complet (CAO-FAO-DCN).

Dans leurs travaux Kochan et al. [KOC99] complètent les travaux réalisés par Chua et al. [CHU98] en rentrant plus dans les détails au niveau de la description des procédés de fabrication additive, en les replaçant dans le contexte de la chaîne numérique en fabrication. Mais dans ces travaux, une fois encore les idées sont engagées sans finalement aller jusqu'à la proposition d'un nouveau modèle complet de description intégré dans un système numérique complet.

Pour ce qui concerne les propositions de modèles complets, les travaux de Campbell et al. [CAM96] peuvent aussi être cités. Par rapport aux travaux précédemment étudiés Campbell et al. proposent d'introduire les données sur la pièce (caractéristiques mécaniques, géométrie...) dans son modèle. Mais ces travaux ne sont restés qu'au statut de proposition non concrète et ne propose pas de nouveau squelette pour la modélisation des procédés de fabrication par ajout de matière.

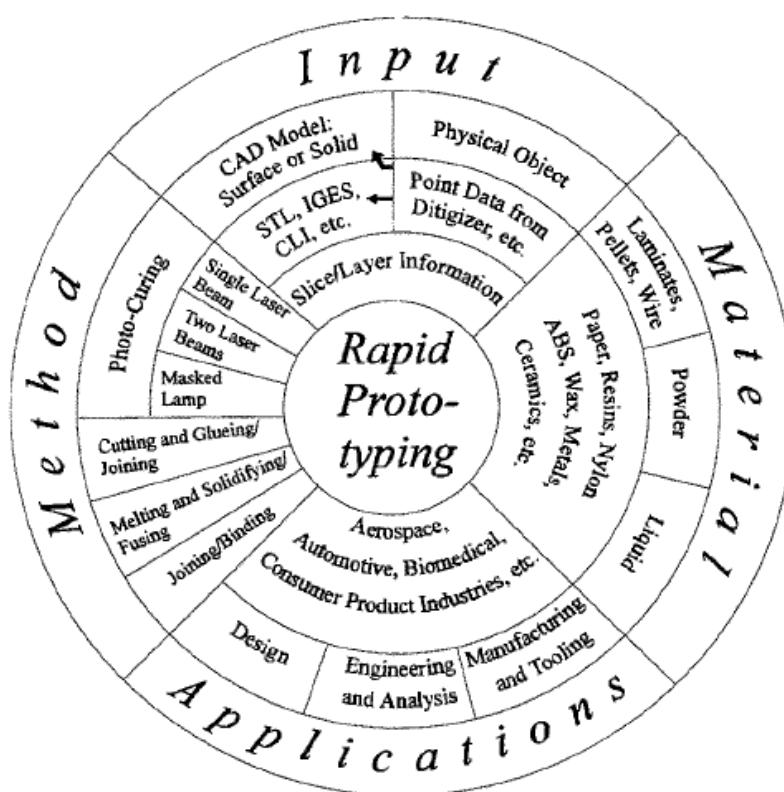


Figure 15 : Quatre principaux aspects des procédés de fabrication additive [CHU98]

Dans le domaine de la modélisation des données lors d'un projet de fabrication par ajout de matière, les travaux de Ding et al. [DIN04] font partie des travaux les plus aboutis. En effet, celui-ci propose une modélisation complète de la chaîne numérique en fabrication additive : système de modélisation virtuelle, modèle CAO, modèle FAO et description de la fabrication. Si l'approche par modélisation de la chaîne numérique va dans la bonne direction, la réflexion s'est malheureusement limitée à la définition d'un modèle de données pour la réalisation d'outillage rapide et non la fabrication additive dans son ensemble. Cependant, l'architecture de ce modèle (voir Figure 16) qui propose une intégration dans un

modèle numérique complet est une avancée par rapport aux modèles complets définis précédemment. La limite de ce modèle numérique demeure tout de même le standard de données utilisé pour la fabrication qui ne fournit que des informations de bas niveau conceptuel et la description des procédés qui se limite uniquement à une aide au choix, qui ne propose pas de modèle générique des procédés.

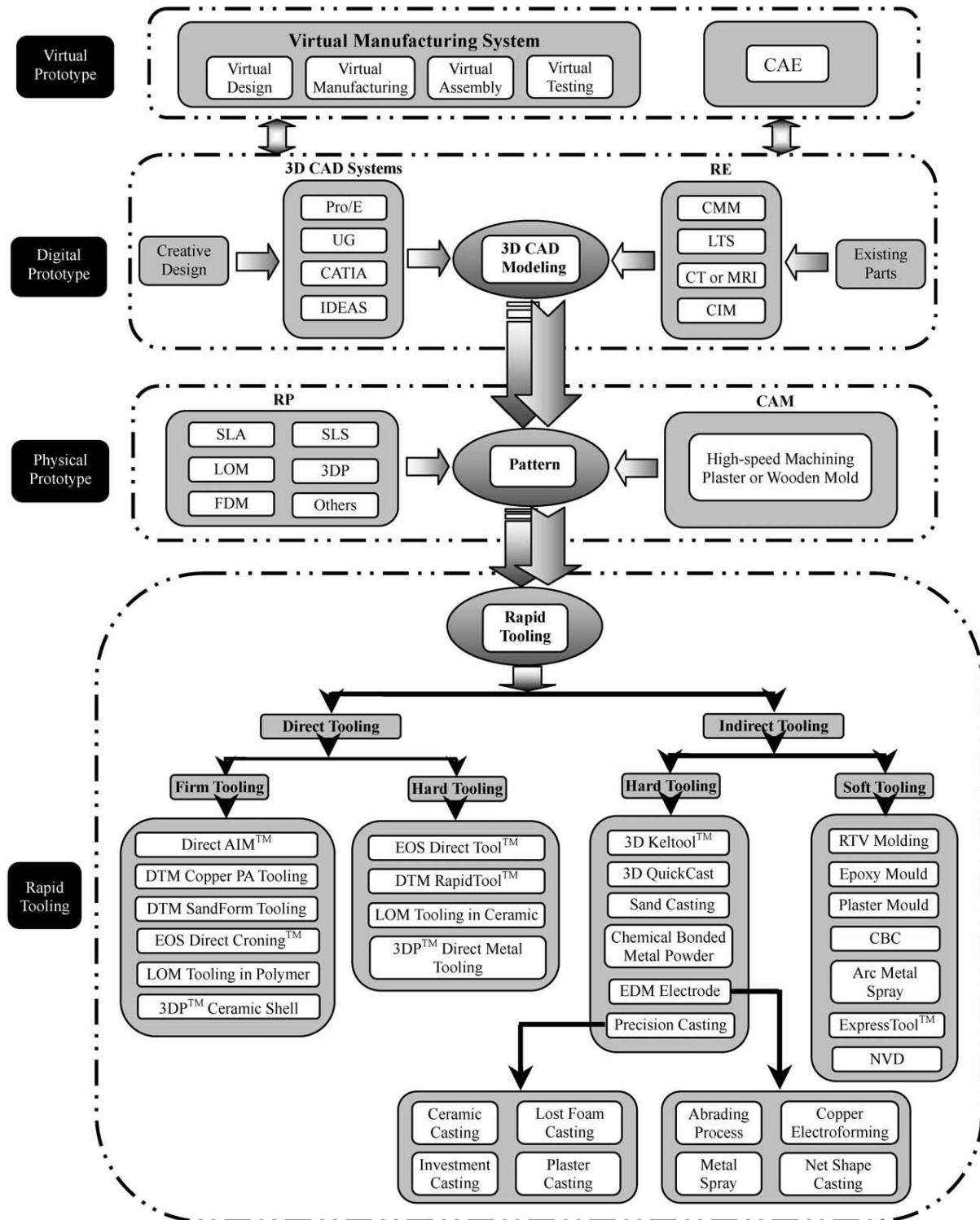


Figure 16 : Architecture d'un modèle de description et d'aide au choix pour l'outillage rapide [DIN04]

A la suite de cette étude, le constat peut être fait qu'il existe peu de modèles complets de description de projets de fabrication additive. Par ailleurs dans les modèles proposés aucun n'est pleinement satisfaisant : absence d'intégration dans une chaîne numérique complète, manque de détails dans les différentes parties du modèle, modèle limité à l'outillage rapide. La proposition d'un nouveau modèle complet et exhaustif de description des procédés de fabrication additive est donc aujourd'hui nécessaire. Cependant, avant la réalisation d'un tel modèle, nous allons étudier dans la suite de ce chapitre les différents modèles plus restrictifs qui se sont intéressés uniquement à certains aspects des procédés de fabrication additive. Cette étude nous permettra d'identifier quelques-unes des données qui composeront notre modèle complet de description des procédés de fabrication par ajout de matière.

3.2 Description des différentes technologies de fabrication additive

Les types de modèle les plus développés dans la littérature sont les modèles de description ou de structuration des technologies des machines de fabrication additive [CAM94] [PAU96] [YAN96] [PHA98] [DIN04] [KRU05] [RUA06] [COS06]. Pour la plupart d'entre eux le but de cette description est d'avoir une bonne connaissance des procédés de fabrication additive existant, et pas une vision complète d'un projet de fabrication additive. Les travaux réalisés dans ce cadre et l'organisation des données sur les différentes technologies de fabrication additive pourront en revanche servir de base pour la structuration des procédés existants dans un nouveau modèle complet. Leur méthode de classification des procédés de fabrication additive est pour la plupart pertinente. Les deux figures suivantes (Figure 17 et Figure 18) sont des exemples de structuration des machines en fabrication additive.

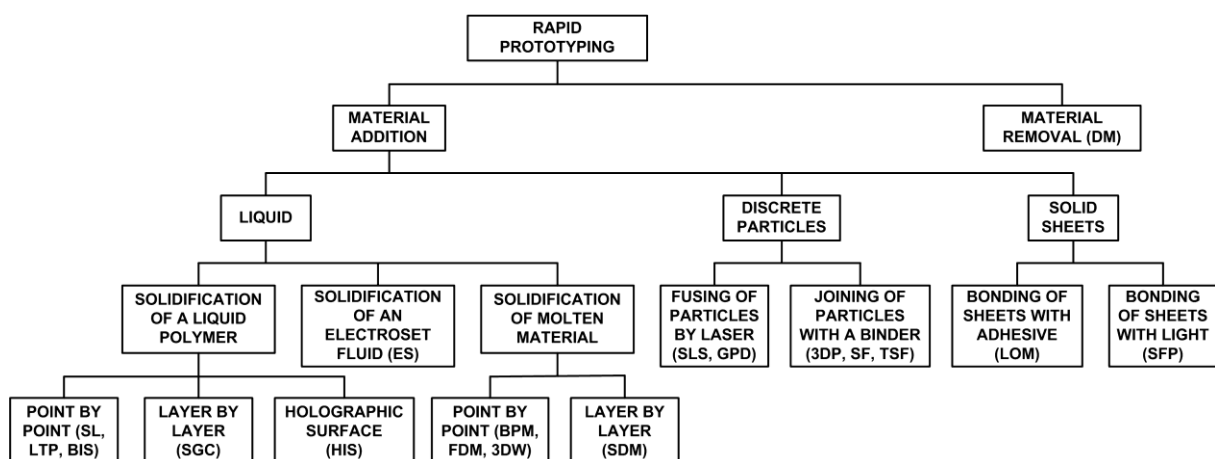


Figure 17 : Structuration des différentes technologies en fabrication additive [PHA98]

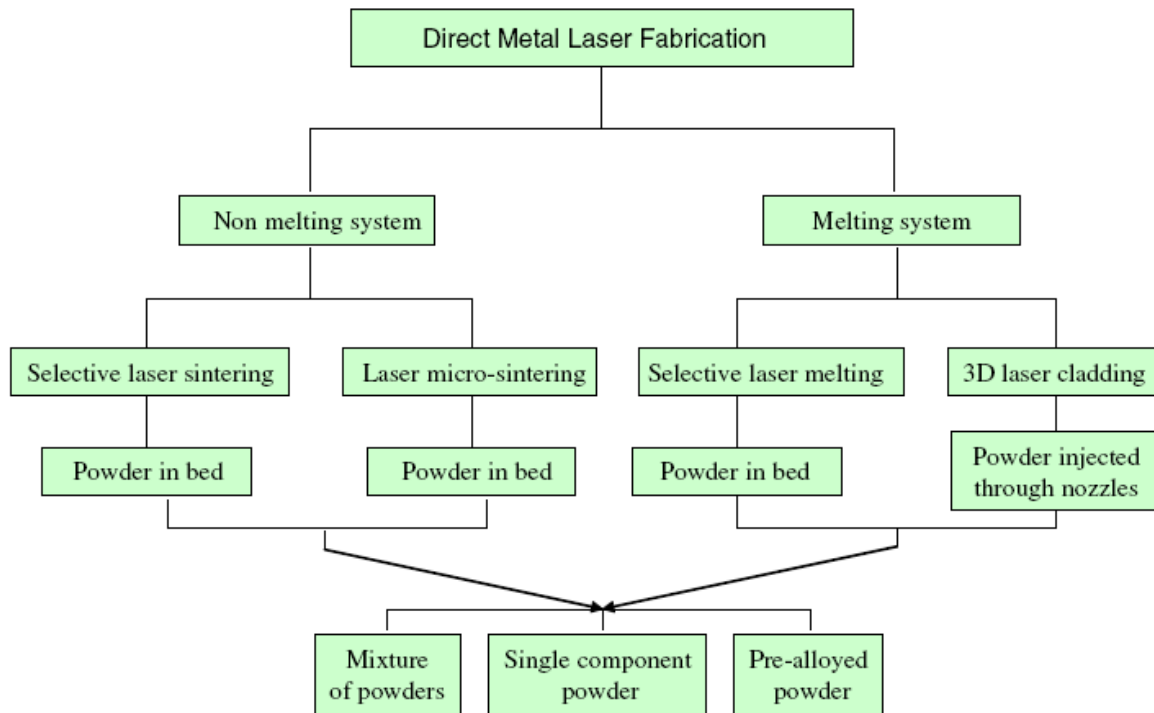


Figure 18 : Structuration des technologies métalliques en fabrication additive [COS06]

D'autres modèles développés classent les technologies de fabrication additive en fonction du type de matériau pouvant être transformé [HON03] [LEV03] [RUA06]. Ainsi comme présenté sur la Figure 19, Levy et al. proposent une classification des différentes technologies de fabrication d'outillage organisées suivant les matériaux des pièces fabriquées. C'est une vision qui est trop limitée désormais, car l'évolution des machines de fabrication additive et des poudres développées fait que désormais les matériaux ne sont plus la principale contrainte pour la réalisation de pièces par ajout de matière.

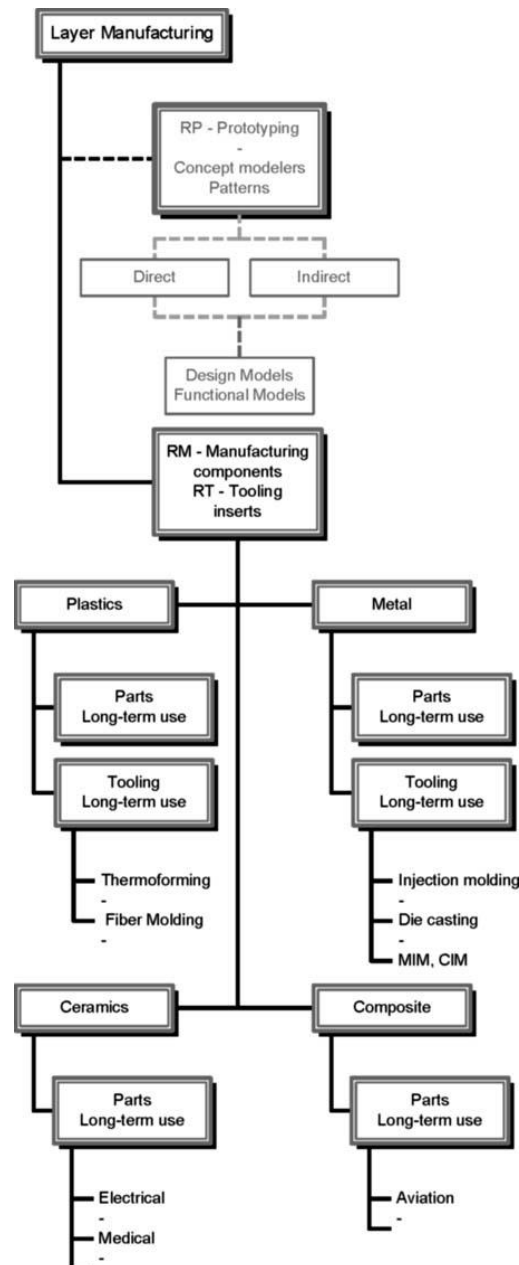


Figure 19 : Description des technologies métalliques en fabrication additive [LEV03]

3.3 Aide au choix des procédés de fabrication additive

Une étude des différents travaux analysés dans le paragraphe précédent permet de mettre en évidence une grande diversité des technologies de fabrication par ajout de matière. C'est pourquoi d'autres travaux ont été réalisés en parallèle pour aider les utilisateurs de procédés de fabrication additive à choisir parmi toute cette diversité. C'est ainsi que Masood et al. [MAS02] propose un système expert pour la sélection d'un procédé de fabrication additive adapté au type de pièces ou projets que l'ont veut réaliser. Les travaux de Byun et al. [BYU05] proposent eux d'utiliser une méthode TOPSIS pour aider à la décision pour le choix d'un procédé de fabrication additive. D'autres travaux réalisés par Armillotta [ARM08] proposent toujours une aide à la décision pour le choix de procédés de fabrication par ajout de matière, mais ici basée sur un modèle AHP (Analytic Hierarchy

process). L'étude des différents critères et des données de fabrication utilisés pour aider au choix des procédés dans ces différents travaux seront des informations importantes à prendre en compte pour la réalisation d'un nouveau modèle de description. Ces informations viennent en complément des informations étudiées au paragraphe précédent, pour la description des différents procédés de fabrication par ajout de matière existant.

3.4 Virtualisation en fabrication additive

Pour ce qui concerne les modèles virtuels de description des procédés de fabrication additive, la plupart des travaux sont le fruit du travail de Choi et al. Ainsi ils proposent différentes approches pour la modélisation virtuelle des procédés de fabrication additive [CHO02] [CHO03] [CHO04] ou la modélisation des procédés de fabrication par ajout de matière permettant l'obtention de pièce multi-matériaux [CHO05]. Ces démarches sont intéressantes dans le cadre de l'introduction de la fabrication additive dans une chaîne numérique complète qui pourra introduire des modules de virtualisation.

3.5 Modèle intégrant de l'optimisation et/ou de la simulation

Une part non négligeable des contributions sur les modèles de données pour la fabrication additive propose également des solutions pour réaliser de l'optimisation ou de la simulation de ces procédés. Ainsi de nombreux travaux ont été menés proposant des modèles pour déterminer la direction optimale de fabrication suivant différents critères :

- Coût de fabrication minimum [ALE98] [HAI03] [MAS03] [PAN07].
- Adaptées à un certain type de procédés ou de fabrication : [LAN97] [KIM05] pour la stéréolithographie, [THR04] pour la fusion, [HU02] [MOG07] [RIV09] [KER10] pour la fabrication hybride...
- Pour minimiser les opérations de finition en usinage [AHN07].

Le modèle complet qui sera proposé dans la suite de ce manuscrit sera construit de manière la plus ouverte possible, pour pouvoir intégrer des modules d'optimisation ou de simulation sans encombre. Ceci, dans le but d'avoir des procédés de fabrication additive qui soient les plus performants possible.

3.6 Autres modèles

D'autres modèles de description de certains points de la fabrication additive ont été développés, notamment au niveau de notre équipe de recherche par P. Mognol pour la modélisation de l'énergie électrique consommée lors de la fabrication [MOG06]. D'autres études s'intéressent elles à l'organisation du planning de fabrication des procédés de fabrication additive. Kulkarni et al. [KUL00] proposent un état de l'art dans ce domaine et plus récemment Volpato et al. [VOL09] ont fait une proposition de nouveau système générique de préparation de la fabrication. Toutes ces analyses seront prises en compte pour leur intégration dans le nouveau modèle de données que nous proposerons dans le chapitre 3 de ce manuscrit.

3.7 Conclusion

Nos travaux visent à la proposition d'une nouvelle chaîne numérique basée sur un standard de haut niveau conceptuel pour les procédés de fabrication par ajout de matière. Nous avons vu dans le premier chapitre que cette proposition ne pouvait être faite directement. Nous avons donc proposé une méthodologie qui s'appuie sur un nouveau modèle complet et hiérarchisé des données de fabrication additive (étape 2 de la méthodologie). Ce modèle hiérarchisé définissant toutes les données et informations qui seront dans un second temps intégrées dans le standard de haut niveau conceptuel choisi (choix réalisé en étape 3 et intégration des données en étape 4).

Nous avons donc regardé dans la littérature si ce type de modèle avait déjà été proposé dans le passé par d'autres équipes de recherche. Une étude des travaux en fabrication additive, nous a permis de conclure qu'aucun modèle de ce type n'avait été proposé. Nous proposerons donc dans le chapitre 3 de ce manuscrit un nouveau modèle de description. Pour être le plus exhaustif possible dans la richesse des données de notre modèle de description de la fabrication additive, nous avons procédé dans cette partie à une large analyse des principales études menées autour de la description, l'organisation ou la structuration des données en fabrication par ajout de matière. Cela nous a permis de mettre en avant des approches plus ou moins complètes et/ou abouties. A partir de toutes ces données, notre rôle est maintenant d'intégrer ces données et d'autres complémentaires (que nous avons identifiées), dans notre nouveau modèle complet. Pour avoir une certaine cohérence au niveau de notre modèle, nous hiérarchiserons ces informations, pour faciliter son intégration dans un standard de haut niveau conceptuel.

4. Un outil pour une chaîne numérique performante : le format de haut niveau conceptuel STEP

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre de ce manuscrit, l'obtention d'une chaîne numérique performante pour la fabrication additive passe par la définition d'un nouveau modèle hiérarchisé des données (étape 2 de la méthodologie). L'étape suivante est l'analyse et le choix d'un outil de standardisation pour y intégrer ce modèle de données (étape 3 de la méthodologie).

Comme nous l'avons brièvement évoqué dans le premier chapitre, le standard STEP semble être une réponse satisfaisante pour l'obtention d'une chaîne numérique performante. Dans la suite de ce chapitre, nous montrerons plus en détail que ce standard est un bon outil pour rendre la chaîne numérique en fabrication additive performante.

Pour cela, nous présenterons la norme STEP en général, puis nous montrerons que cet outil est adapté à la fabrication additive, enfin nous nous intéresserons au standard STEP-NC en particulier, qui est le modèle STEP développé pour favoriser l'intégration de la chaîne numérique complète avec des données compatibles depuis le modèle CAO jusqu'au DCN, en passant par la FAO.

4.1 La norme STEP ISO 10303

4.1.1 Définition

Les investissements en ressources numériques (solutions informatiques, logiciels...) pour la réalisation d'un projet de fabrication, deviennent très souvent secondaires par rapport à la valeur et l'importance qui sont données aux données générées par ces différents systèmes. En effet, le besoin des industriels est aujourd'hui de disposer des données au bon endroit et au bon moment, indépendamment des moyens utilisés. Or, la satisfaction de ce besoin est rendue difficile par la multiplication des solutions informatiques, le nombre d'entreprises travaillant sur le même projet et l'éloignement des sites de conception et fabrication. Tout ceci rend également difficile, à la fois, la capitalisation des données, mais aussi l'échange des données entre solutions numériques hétérogènes.

C'est dans ce contexte, que la norme STEP ISO 10303 **[ISO94a]** (Standard for the Exchange of Product model data) a vu le jour au début des années 90, dans le but de favoriser l'échange, le partage et l'intégration des données dans la chaîne numérique. Pour cela, le but de cette norme est de définir de manière non ambiguë toutes les données d'un produit, dans tous ses cycles de vie. De plus, il faut assurer une complète interopérabilité et portabilité de ces données pour qu'elles soient interprétables par tout type de système informatique.

Le développement de ce nouveau format a donc été confronté à deux difficultés majeures :

- Créé un format qui soit interprétable par tous les systèmes informatiques quel que soit le système qui a généré les données.

- Faire collaborer des gens d'univers très différents avec des spécialistes de la modélisation des données pour arriver à décrire tous les cycles de vie d'un produit.

La résolution de ces problèmes a conduit à proposer la définition d'un langage formel de spécification des données (le langage EXPRESS) et à la définition de formats d'échange standard de données décrites avec ce langage. Dans un second temps la décision a été de développer les parties spécifiques de chacun des cycles de vie d'un produit dans des comités différents. Ces différents comités étant composés de spécialistes du domaine qui développent chacun un protocole d'application particulier. La définition du langage EXPRESS ainsi que l'organisation de la norme STEP en protocole d'application seront décrits dans la suite du chapitre.

Après plus de 15 ans de travaux, au cours desquels plusieurs centaines d'experts appartenant à 19 pays (Australie, Belgique, Brésil, Canada, Chine, France, Allemagne, Hongrie, Italie, Japon, Corée du Sud, Pays-Bas, Norvège, Roumaine, Russie, Suède, Suisse, Royaume-Uni, Etats-Unis) se sont réunis plus de trois fois par an, une véritable technologie a été développée. Cette norme est décrite dans les différents fascicules de la norme STEP, officiellement la norme ISO 10303 [ISO94a]. Celle-ci comporte actuellement, publiés ou encore en travaux, environ 110 fascicules soit quelques dizaines de milliers de pages de spécifications.

4.1.2 Organisation de la norme STEP ISO 10303

La Figure 20 ci-dessous présente les différentes parties de la structure de la norme STEP. Ce sont ces différentes parties qui ont été développées ou sont encore en cours de développement au niveau de la norme.

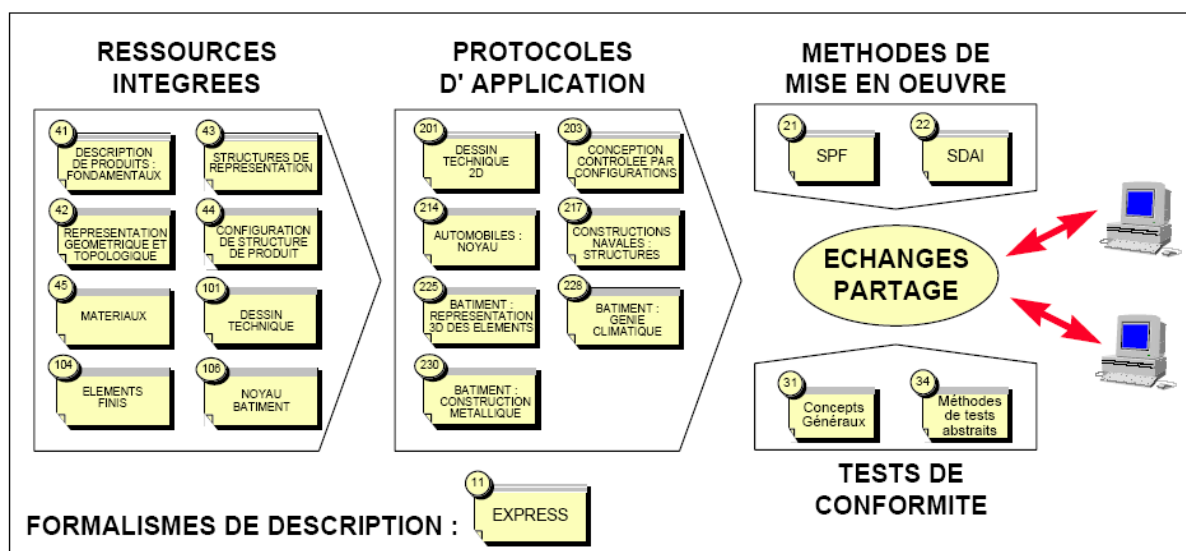


Figure 20 : Structure de la norme STEP

La norme STEP est structurée en cinq grandes parties distinctes :

- Le formalisme de description : c'est le langage EXPRESS qui permet de décrire les modèles numériques STEP.
- Les méthodes de mise en œuvre qui permettent : l'échange de modèles, le partage en mémoire, le partage à travers l'interface SDAI et l'échange de connaissances.
- Les tests de conformité qui ont pour objectif d'assurer la conformité d'une mise en œuvre particulière d'un protocole d'application avec la norme STEP en la vérifiant avec la suite de tests abstraits correspondant (par exemple le protocole AP203 doit être vérifié avec la suite ATS303).
- Les ressources intégrées qui sont les ressources communes au modèle d'information produit et qui constituent les blocs pour la construction des protocoles d'application (AP).
- Enfin, les protocoles d'application et suite de tests abstraits.

A la suite de ce paragraphe, le langage EXPRESS ainsi que l'organisation en protocoles d'application vont être présentés.

4.1.3 Le langage de description EXPRESS

Lorsque les travaux autour du développement de la norme STEP ont commencé, aucun langage de communication permettant de décrire des données de manière suffisamment précise et expressive n'existait [SCH94]. Le choix a donc été fait de développer un nouveau langage spécifique : le langage EXPRESS.

EXPRESS [ISO94b] est donc le langage de modélisation des données conçu dans le cadre du développement de la norme STEP. Son objectif principal est la description de modèles d'informations dans le domaine technique, en vue de l'échange de données représentant de façon fiable et non ambiguë ces informations [SW94] [BOU95a] [BOU95b]. Dans ce langage l'accent est mis sur la précision du modèle et plus précisément sur les conditions que doivent respecter les données pour être conforme au modèle initial. Ceci, nous assurant la fiabilité de l'information qui est donnée par le modèle STEP.

Un modèle EXPRESS définit un ensemble d'entités qui représentent les objets à modéliser. Chaque entité est définie par un ensemble de caractéristiques appelées attributs. Chaque attribut possède un domaine de valeurs licites (type de données, pouvant eux-mêmes être des entités). EXPRESS permet de préciser ces domaines grâce à des contraintes d'intégrité. Enfin, conformément à l'approche objet, les entités sont organisées de façon hiérarchique par des relations de généralisation/spécialisation associées à un mécanisme de factorisation/héritage [PIE00] [ELK02].

L'exemple de la Figure 21 présente une arborescence d'entités : quatre sous-types d'entités, *région*, *two5D_manufacturing_feature*, *transition_feature* et *technology_feature*, sont des spécialisations d'un super-type d'entités non instanciable (mot clé ABSTRACT), *manufacturing_feature*. De plus *additive_manufacturing_feature* est une sous-entité de *technology_feature*.

```

ENTITY manufacturing_feature                                (* m1 *)

  ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF (region, two5D_manufacturing_feature, transition_feature,
  technology_feature));

ENTITY technology_feature                                  (* m0 *)

  ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF (additive_manufacturing_feature));
  SUBTYPE OF (manufacturing_feature);
  
```

Figure 21 : Exemple de hiérarchisation des données dans le langage EXPRESS

La représentation textuelle des schémas EXPRESS est essentielle pour le traitement automatique des modèles. C'est elle qui pourra être exploitée par la machine pour vérifier sa correction, ou vérifier si des instances lui sont conformes. Elle est, par contre, assez difficilement lisible. Un formalisme graphique, EXPRESS-G [ISO94b] [SW94], a donc été défini pour donner une vue synthétique des modèles de données et faciliter leur conception. La nature des attributs (optionnel, dérivé ou inverse), ainsi que leur type, peuvent, par contre, être représentés. Un exemple de représentation EXPRESS-G est donné sur la Figure 22 suivante.

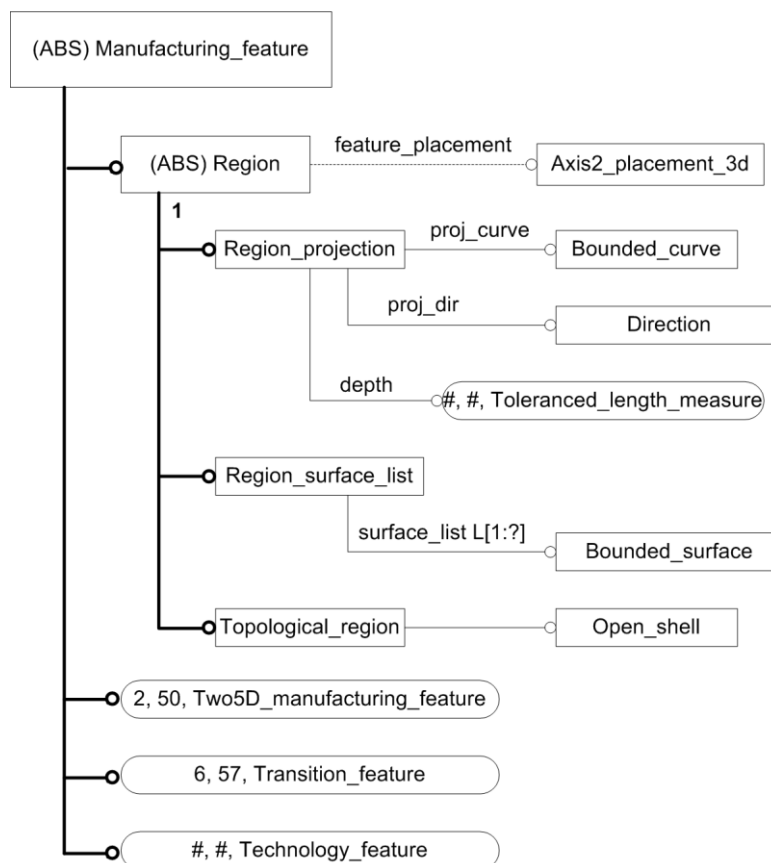


Figure 22 : Exemple de représentation EXPRESS-G

Comme le démontre Pierra [PIER00], à la différence des nombreuses notations existantes pour modéliser des données telles que NIAM [HAB93], OMT [RUM91], ou UML [JAC99] qui ne sont que graphiques et donc seulement échangeable entre êtres humains, le fait, pour EXPRESS, de posséder à la fois une version graphique et une version textuelle

rend ce langage traitable par machine. Un modèle EXPRESS peut donc être échangé entre différents systèmes numériques. Il peut également être traité par un système informatique pour en vérifier la cohérence, ou pour passer automatiquement de la version graphique à la version textuelle et inversement. Il peut enfin être exploité pour générer automatiquement différents programmes ou représentations informatives. Il s'agit donc bien à la fois d'un modèle interprétable par l'utilisateur humain, et d'une spécification interprétable par des systèmes informatiques.

Comparé aux autres notations existantes, EXPRESS possède les points forts suivants :

- Il s'agit d'un standard international stable, bien documenté et de plus en plus utilisé.
- Il possède une syntaxe et une sémantique précises autorisant, avec des outils appropriés, une interprétation et un traitement automatique des modèles.
- Il possède une représentation graphique qui fournit une vue synthétique du modèle pour mieux le comprendre ou le concevoir.
- Il possède un système de contraintes complet (contraintes de cardinalité, contraintes ensemblistes, contraintes assertionnelles, contraintes fonctionnelles, contraintes sur les classes...), ainsi qu'un langage procédural permettant d'enrichir celles-ci.
- Il permet la ré-utilisation, grâce à sa modularité, des schémas de ressources existants et autorise donc un développement incrémental de modèles de plus en plus vastes et complexes.

4.1.4 Organisation de la norme ISO 10303 en protocoles d'application

Les approches génériques pour la description d'un produit dans toutes ses phases de vie ne peuvent plus être satisfaisantes. En effet, pour être le plus performant possible chaque corps de métier a développé ses propres savoirs et savoirs faire par spécialité. Ainsi, pour la réalisation d'un projet d'industrialisation un ingénieur en conception n'aura pas besoins des mêmes outils et langage qu'un ingénieur de production. C'est au niveau de chacune de ces spécialisations que doivent donc être conservées les données et si possible articulées avec les niveaux voisins. Dans la norme STEP, ces données sont présentes au niveau des protocoles d'application.

Il a donc été créé différents comités ISO qui travaillent à l'élaboration des différents protocoles d'application composés de spécialistes du domaine abordé. C'est ainsi que pour la définition de modèles de produits conformes à la norme STEP, l'ISO propose une méthodologie pour le développement de protocoles d'application (voir Figure 23). Cette méthodologie peut être utilisée pour élaborer des modèles normalisés de produits propres à chaque organisation. L'AAM permet de recenser les différentes activités du modèle, les flux d'informations à prendre en compte et d'établir un glossaire du vocabulaire utilisé. Ensuite, l'ARM mène à une formalisation avancée des données utilisateurs regroupées en unités fonctionnelles. Pour finir, l'AIM est une opération de mise en correspondance des données utilisateurs avec les ressources intégrées génériques.

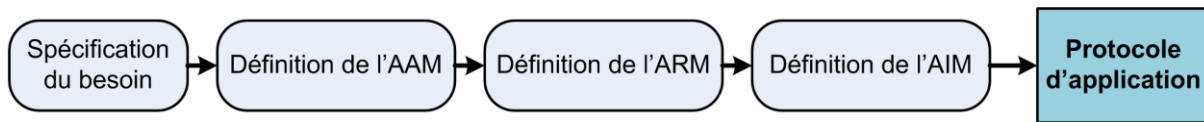


Figure 23 : Cycle de développement d'un protocole d'application

Nos travaux de recherche s'intéressant aux procédés de fabrication en général, nous nous intéressons uniquement aux protocoles d'application utilisés dans le cadre de la réalisation de produits manufacturés. Une présentation de ces différents protocoles d'application et de leur fonctionnement dans la chaîne numérique est faite dans le paragraphe suivant.

4.1.5 La norme STEP pour la réalisation de produits manufacturés

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, la norme STEP ISO 10303 est composée de plusieurs protocoles d'application portant chacun sur un domaine spécifique. Le modèle numérique initial (au niveau de la CAO), est enrichi au fur et à mesure de la chaîne numérique avec des informations données par chacun de ces protocoles d'application. Cela permet d'avoir un même modèle depuis le modèle CAO jusqu'à la CN. Les informations de haut niveau conceptuel peuvent donc arriver jusqu'à la commande numérique. Toutes les opérations de post-processing sont éradiquées.

La Figure 24 présente les principaux protocoles d'application utilisés dans le cadre de la production mécanique : le modèle numérique initial est enrichi au fur et à mesure par l'ensemble des informations nécessaires à la réalisation du produit (allant de la FAO, jusqu'aux simulations numériques). Il n'y a donc aucune conversion numérique à effectuer, ce qui supprime tout risque de perte d'information ou d'erreur de traduction pendant les différentes étapes de la chaîne numérique [XU04].

Par ailleurs, le format STEP assure une complète interopérabilité et portabilité des données numériques. Un autre avantage du format STEP est que toutes les modifications ou optimisations faites au pied de la machine de fabrication sont automatiquement prises en compte au niveau du modèle CAO, car le flux d'information est bi-directionnel.

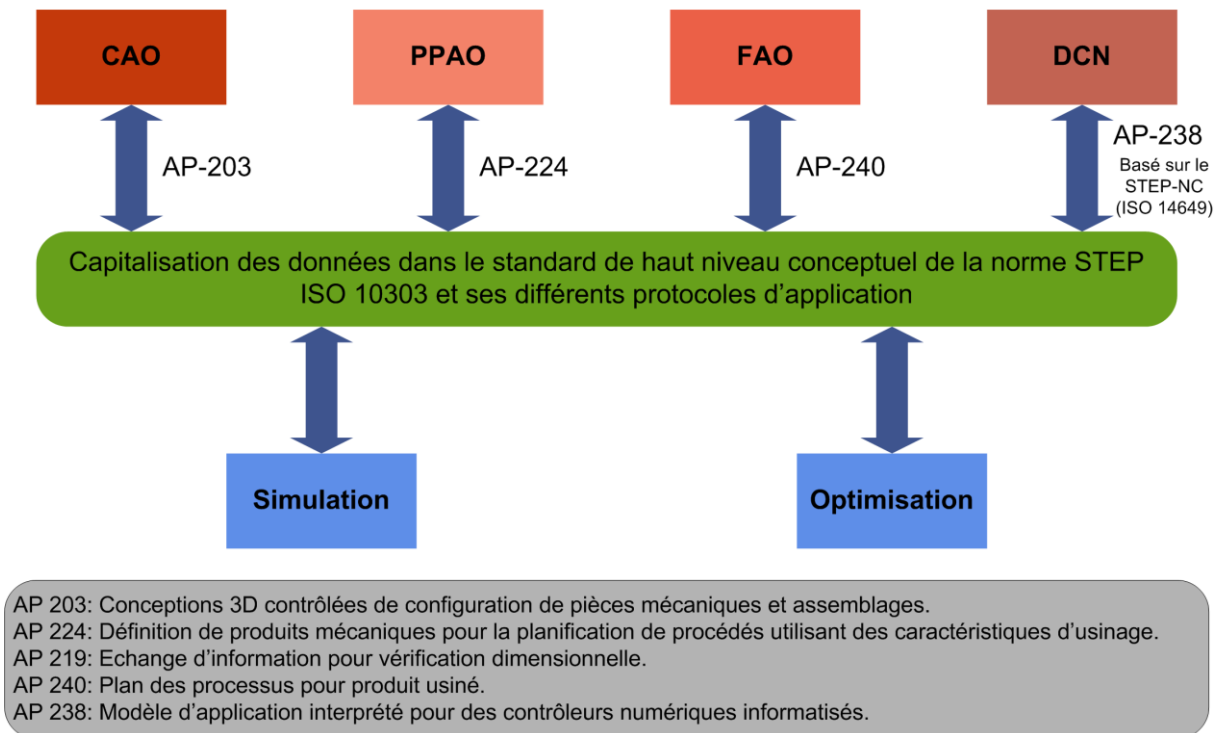


Figure 24 : Principaux protocoles d'application utilisés lors d'un projet de fabrication

4.1.6 Conclusion

Le format STEP est un standard de haut niveau conceptuel qui répond parfaitement aux exigences d'une chaîne numérique performante, comme défini dans le chapitre 1 :

- Intégration de la chaîne numérique CAO-FAO-DCN dans un unique standard de données de haut niveau conceptuel.
- Pas de perte de données durant les différentes étapes de la chaîne numérique et les post traitements.
- Non multiplication des fichiers de données lors de la chaîne numérique : un seul modèle est enrichi tout au long de la chaîne numérique.
- Echange bidirectionnel des données au niveau de toutes les étapes du projet de fabrication.
- Exploitation des données facilement.
- Pas d'opération de post-processing dans la chaîne numérique.
- Interopérabilité et portabilité du modèle.

Les procédés de fabrication par ajout de matière ayant besoin pour leur développement d'une chaîne numérique performante, nous verrons dans le chapitre suivant que le format STEP est un standard adapté pour ces procédés.

4.2 La norme STEP un outil adapté pour la chaîne numérique performante en fabrication additive

4.2.1 Situation de la fabrication additive avec le format STL

A l'heure actuelle, le format utilisé en fabrication additive pour importer le modèle numérique de la pièce, est le STL. Or comme souligné dans plusieurs travaux de recherche **[STR00]** **[PRA02]** **[RYO06]** **[DAN08]** et mis en avant dans le premier chapitre de ce manuscrit ce format a beaucoup de carences.

Comme nous l'avons rappelé dans le premier chapitre, si hier les procédés par ajout de matière étaient uniquement réservés à la simple maquette de visualisation, ils sont maintenant utilisés pour réaliser des pièces fonctionnelles et deviennent ainsi des concurrents directs des procédés de fabrication plus traditionnels. Il est donc pour eux, désormais, plus que nécessaire de s'appuyer sur une chaîne numérique complète dotée d'un standard de données performant.

C'est pourquoi plusieurs équipes de recherche ont focalisé leurs efforts et attention au développement de nouveaux formats standards qui seraient une alternative au format STL, et seraient capables de fournir toutes les informations nécessaires sur la géométrie du modèle numérique.

4.2.2 Travaux sur l'utilisation du format STEP en fabrication additive

Depuis le milieu des années 90, les études s'intéressant au remplacement du format STL dans la chaîne numérique ont commencé. La majorité de ces recherches arrivent à la conclusion que le meilleur format pour ces procédés est le format STEP ISO 10303 **[ISO94a]** qui offre de nombreuses qualités telles que :

- C'est un modèle qui permet de conserver des informations géométriques.
- Il peut contenir des informations sur les matériaux, la texture des surfaces...
- Il a des données concernant le process de fabrication.
- Il n'est pas redondant.
- Il ne multiplie pas le nombre de fichier, un unique modèle est enrichi.
- Modèle générique qui assure une bonne interopérabilité et portabilité des données.

Une analyse bibliographique des principales études menées ces vingt dernières années sur le format STEP et la fabrication additive est faite dans le paragraphe suivant.

Carleberg **[CAR94]** a été le premier à mentionner le STEP **[ISO94a]** comme format numérique pour la fabrication additive, sans pour autant proposer de fondements pour l'intégration de ces procédés dans la norme STEP. Gilman **[GIL95]** dans son papier a été le premier à proposer une méthodologie qui regroupe un environnement hétérogène de FAO et la fabrication couche par couche en s'appuyant sur la norme STEP. Ensuite, un groupe de recherche **[PRA95]** **[JEE96]** **[JUR99]** du NIST (National Institut of Standards in Technology) a proposé, jusqu'à la fin des années quatre vingt dix, de développer de nouvelles capacités pour la norme STEP **[ISO94a]** adaptées à la fabrication additive. Une première tentative de représentation de la base de la norme STEP **[ISO94a]** pour les procédés par ajout de matière a été proposée par le Professeur Jee et son équipe **[JEE99]** sous forme de schéma. Dans cet article ils mettaient l'accent sur les grands bénéfices du format standard STEP **[ISO94a]** pour la conservation des données sur le matériau, la tolérance et la géométrie, pour les objets fabriqués par ajout de matière. Plus récemment, Dutta et al. **[DUT02]** ont discuté des données numériques générales nécessaires en prototypage rapide et en sont

arrivés à la conclusion que le développement de la norme STEP pour la fabrication additive était nécessaire. Dans le même temps Lee et al. [LEE03] ont proposé pour la première fois une introduction concrète des procédés par ajout de matière dans la norme ISO 14649 (STEP-NC) [ISO03a], au même niveau que les procédés par enlèvement de matière dans les further technologies (voir Figure 25).

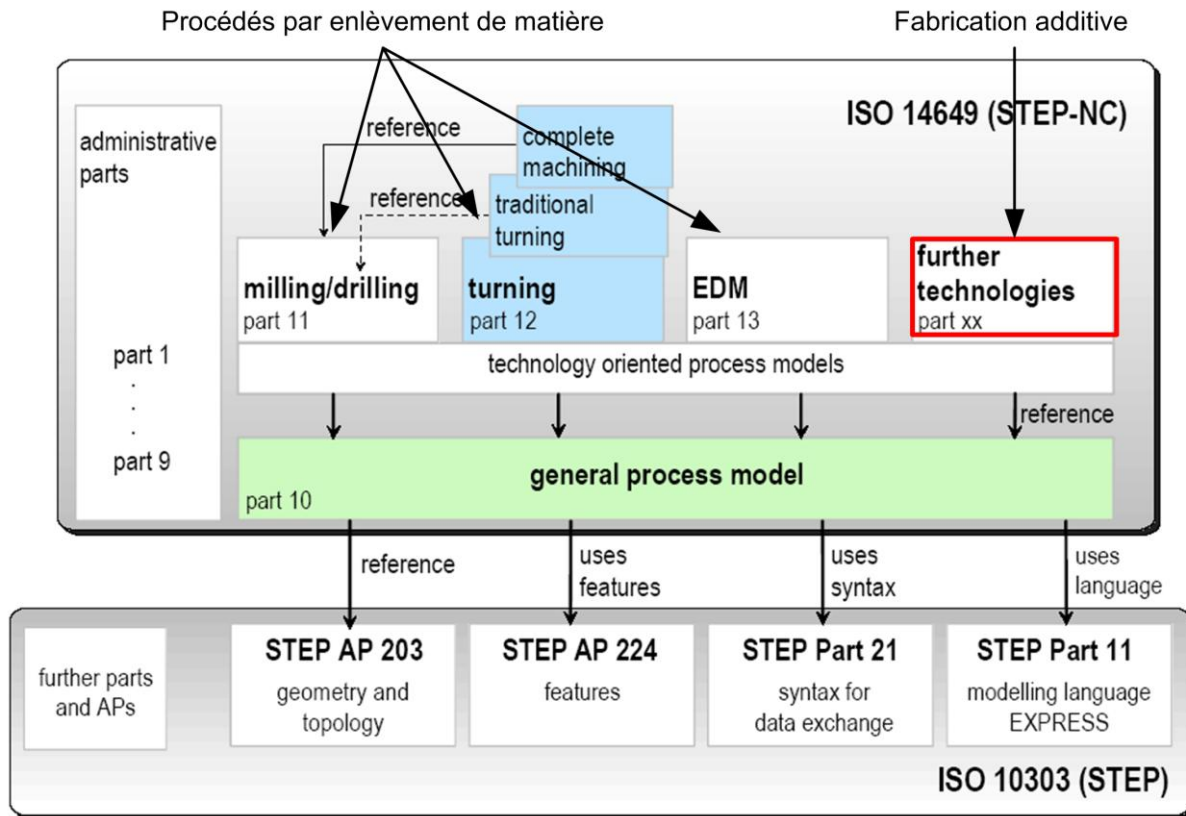


Figure 25 : Introduction de la fabrication additive dans la structure STEP-NC

Enfin les études les plus abouties ont été réalisées par l'équipe du Professeur Jee [RYO06] qui est allée jusqu'à proposer une méthodologie pour l'introduction du prototypage rapide dans la norme STEP-NC [ISO03a] et qui a développé un pré-processeur en STEP-NC pour les procédés par ajout de matière. C'est pour cela que dans la suite de la bibliographie, ce sont ces études qui seront les plus étudiées.

Ryou et al. [RYO06] proposent, le développement de la configuration des futurs modèles STEP pour l'Additive Manufacturing (voir Figure 26). Ils ont décidé que les modèles géométriques pouvaient se décomposer en trois catégories principales et une catégorie optionnelle :

- *sub_part-geo_design*.
- *sub_part_non_geo_design*.
- *sub_part_process_history*.
- *sub_part_locally_controlled* (optionnelle).

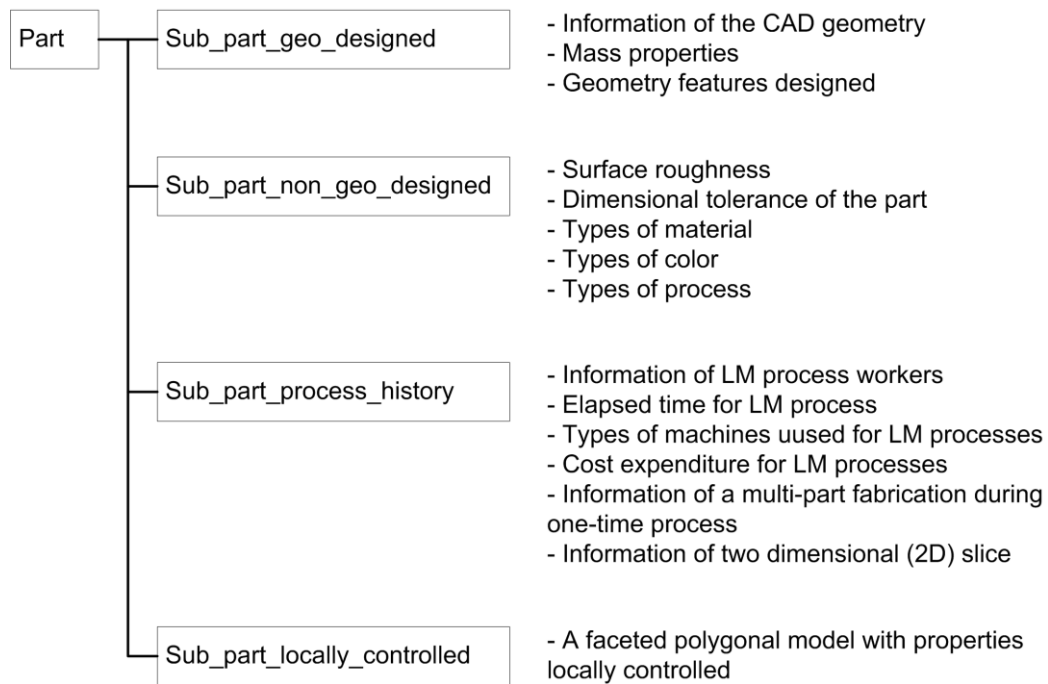


Figure 26 : Interface coréenne pour le prototypage rapide [RYO06]

Le modèle d'information est constitué de la CAO qui contient la géométrie de la pièce et de nombreux paramètres sur le procédé par ajout de matière. Deux représentations géométriques, l'une pour les géométries homogènes et l'autre pour les géométries hétérogènes, sont possibles dans le modèle d'information proposé.

sub_part-geo_design entity

Cette partie de la norme permet la représentation détaillée de la géométrie d'un modèle numérique de CAO. Elle inclut aussi plusieurs renseignements géométriques comme la taille de la pièce, son orientation et sa localisation.

sub_part_non_geo_design design

Cette partie présente les détails de la représentation des informations non géométriques des formes de la pièce, comme la rugosité maximale, les tolérances dimensionnelles et géométriques et les types de post-processeurs compatibles avec le procédé utilisé. Elle inclut aussi des informations sur le matériau et la couleur de la pièce finie. Cette partie qui traite les informations de formes non géométriques, peut donc aider les utilisateurs pour connaître les capacités d'une machine en prototypage rapide et savoir si elle est compatible avec le produit fini attendu.

sub_part_process_history

Cette partie donne des détails sur l'historique des opérations de fabrication déjà réalisées sur la machine de prototypage rapide. En d'autres termes, c'est une compilation des différents paramètres de la machine de prototypage rapide, comme les temps de fabrication, le prix, les personnes et organisations responsables de la fabrication. Cette compilation peut permettre aux utilisateurs d'avoir des données sur les pièces déjà réalisées, les précédents réglages réalisés, les résultats obtenus et donc leur permettre pour la suite d'optimiser le process pour augmenter sa qualité. Toutes ces données sont optionnelles et les différents utilisateurs ne sont pas obligés de les renseigner.

sub_part_locally_controlled

Depuis peu les modèles STL peuvent être fabriqués de plusieurs couleurs. C'est pourquoi Ryou et al. [RYO06] ont proposé une représentation multi couleurs de pièces réalisées en prototypage rapide avec la norme STEP-NC. Lorsque la pièce est définie par un modèle à facettes polygonales, une couleur peut être assignée à chaque facette. Dans leur étude [RYO06] introduisent un modèle RGB, qui habituellement simplifie le rendu des pièces du système graphique de l'ordinateur en amont, pour le transformer en une composition de couleurs de la pièce fabriquée dans le but de contrôler les informations de couleur localement sur les facettes. Dans ce modèle de représentation, le RGB utilise les trois couleurs primaires. Ce changement de couleur local, n'aura, en outre, aucune influence sur les différentes informations du modèle numérique et aucune incidence sur les pièces fabriquées.

Ce modèle proposé ci-dessus propose des informations pour enrichir le modèle existant de l'ISO 14649. La stratégie de l'équipe a été différente à savoir dans un premier temps bien analyser toutes les informations nécessaires à l'élaboration d'un projet de fabrication additive, en les hiérarchisant les unes par rapport aux autres. Puis en analysant finement la norme ISO 14649 existante pour l'usinage définir une stratégie pour obtenir un modèle STEP-NC des procédés par ajout de matière, s'appuyant sur toutes les informations du modèle hiérarchisé.

4.3 La norme STEP au niveau du directeur de commande numérique : le format STEP-NC

4.3.1 Définition

Depuis une dizaine d'années, l'environnement de fabrication dans les entreprises a changé de manière significative, notamment avec l'augmentation et la finesse des informations technologiques associées aux directeurs de commande numérique (DCN). Les machines d'usinage grande vitesse ou de fabrication additive, avec une plus grande précision et la fabrication multi-axes, ont considérablement augmenté la productivité et la qualité de la fabrication. De plus comme mis en avant par le Professeur Suh [SUH08], les avancées d'internet ont permis de développer l'e-manufacturing, notamment à travers le système appelé DABA (pour Design-Anywhere-Built-Anywhere). Ces changements majeurs doivent être accompagnés d'un gros effort de formalisation de ces concepts au niveau de la chaîne numérique CAO-FAO-DCN.

Le STEP-NC s'appuie sur la technologie STEP de modélisation, d'échanges et de partage de données de produits [ELK02]. Comme nous l'avons vu précédemment, cette modélisation s'appuie sur une approche générique complétée par des protocoles d'application élaborés à partir des caractéristiques propres à chaque métier.

La Figure 23 présentée auparavant dans ce chapitre montre que l'AAM permet de recenser les différentes activités du modèle, les flux d'informations à prendre en compte et d'établir un glossaire du vocabulaire utilisé. Ensuite, l'ARM mène à une formalisation avancée des données utilisateurs regroupés en unités fonctionnelles. Pour finir, l'AIM est

une opération de mise en correspondance des données utilisateurs avec les ressources intégrées génériques.

Il existe donc aujourd'hui deux versions de STEP-NC développées à l'ISO **[FEE03]** : la première est la norme ISO 14649 **[ISO03a]** représentant l'Application Reference Model (ARM) et la seconde est la norme ISO 10303-238 **[ISO07]** pour l'Application Interpreted Model (AIM). Les travaux actuels de l'IRCCyN se déroulent dans le cadre de l'utilisation et du développement de la norme ISO 14649 (ARM). Cette norme a pour objectif de préparer des bases solides pour les futures implémentations de STEP-NC au sein de la norme STEP par l'intermédiaire du protocole d'application 238. Dans ce cadre l'IRCCyN participe activement aux comités et travaux de normalisation du groupe de travail ISO TC184/SC1/WG7 pour le fraisage et la fabrication additive **[HAS06a]** **[HAS06b]** **[HAS08]** **[RAU09a]** **[LAG09a]**.

Pour ne pas avoir de discontinuité de la chaîne numérique jusqu'au DCN, le standard ISO 14649 **[ISO03a]** **[SUH06]**, plus communément appelé STEP-NC, est développé pour faciliter la capitalisation et l'échange des données entre les logiciels de CFAO et les directeurs de commande numérique, pouvant même aller jusqu'à l'utilisation de bases de données communes **[NEW03]**. En optimisant au mieux l'utilisation des fonctionnalités des DCN actuels et en simplifiant la programmation par une description orientée objet **[MAE02]**, c'est aujourd'hui une réponse satisfaisante pour s'affranchir des inconvénients associés au format ISO 6983 **[ISO82]** **[SUH02b]**, qui n'évolue pas depuis plusieurs dizaines d'années. De plus, contrairement à l'ancien standard ISO 6983 (aussi appelé code-G) qui permet aussi de communiquer entre l'interface FAO et le DCN, ce standard est un standard de données de haut niveau conceptuel qui autorise le retour d'informations depuis le DCN jusqu'à la CFAO. Comme montré dans le Tableau 2 suivant, ce standard est pour le moment essentiellement développé pour l'usinage, mais l'idée d'introduire la fabrication additive dans une part 17 a vu le jour récemment. Les différentes parties de cette norme sont à des états de développement très différents : certains sont International Standard (IS) et d'autres presque IS (Final Draft International Standard (FDIS) ou Committee Draft (CD)) avec des versions finales pour bientôt (phases de développement 2). D'autres parties ont vu leurs travaux commencer plus récemment WD (Working Draft), comme la fabrication additive.

Part n°	Titre	Phase de développement	Publication
1	Overview and fundamental principles	1	IS
10	General process data	1	IS
11	Process data for milling	1	IS
12	Process data for turning	1	IS
13	Process data for wire-EDM	2	CD
14	Process data for sink-EDM	2	CD
15	Contour cutting	2	WD
16	Process data for inspection	2	WD
17	Process data for additive manufacturing	2	WD
111	Tools for milling	1	FDIS
121	Tools for turning	1	IS

Tableau 2 : Différentes parties de l'ISO 14649 et leurs phases de développement

4.3.2 Organisation et fonctionnement de la norme STEP-NC

La Figure 27 illustre l'organisation de la norme ISO 14649 [ISO03a], avant introduction des procédés par ajout de matière. Cette figure présente également les relations entre les normes ISO 14649 [ISO03a] et ISO 10303 [ISO94a]. Avant ces travaux de recherche, le développement de la norme ISO 14649 pour la fabrication [ISO04a], ne concernait que trois procédés d'usinage : le fraisage [ISO04b], le tournage [ISO04c] et l'électroérosion [ISO04d] [ISO04e].

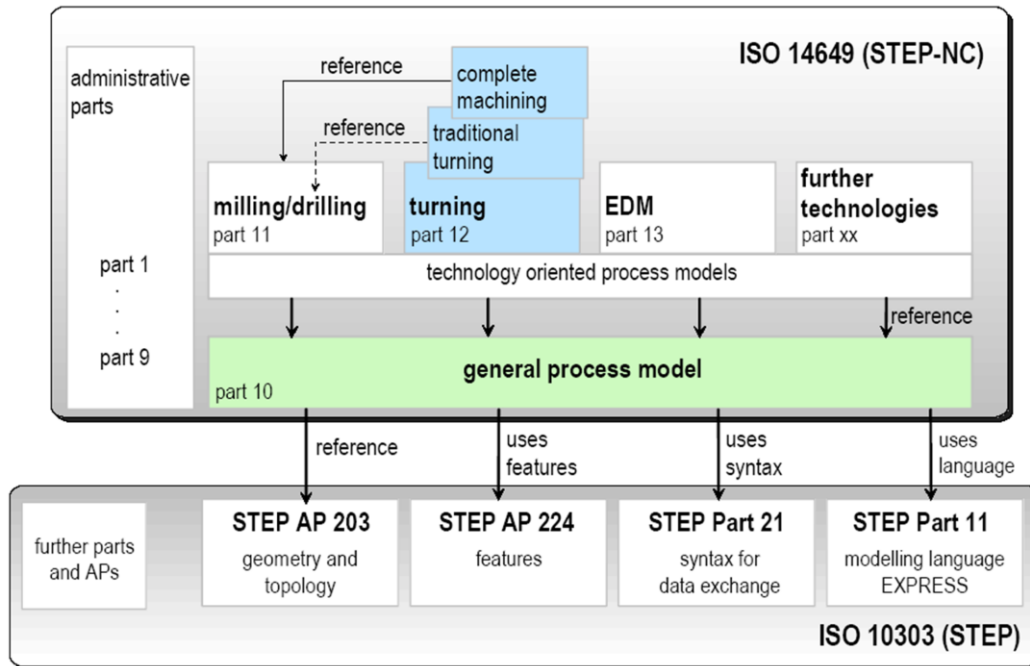


Figure 27 : Organisation des normes ISO 14649 et ISO 10303

L'analyse de cette figure permet de constater que la réorganisation de la chaîne numérique ne se limite pas uniquement aux changements au niveau des DCN mais à une refonte de toute la chaîne. Cela permet d'avoir un modèle unique depuis le modèle CAO jusqu'à la CN. La norme STEP ISO 10303 **[ISO94a]** est composée de plusieurs protocoles d'application portant chacun sur un domaine spécifique. Comme nous l'avons vu sur la Figure 24, l'organisation en protocoles d'application permet au modèle numérique initial d'être enrichi au fur et à mesure par l'ensemble des informations nécessaires à la réalisation du produit (allant de la FAO, jusqu'aux simulations numériques). Il n'y donc aucune conversion numérique à effectuer, ce qui supprime tout risque de perte d'information ou d'erreur de traduction pendant les différentes étapes de la chaîne numérique **[XU04]**.

Un autre avantage du format STEP-NC **[ISO03a]** **[ESP00]**, est que toutes les modifications faites au pied de la machine de fabrication sont automatiquement prises en compte au niveau du modèle CAO, car le flux d'information est bi-directionnel contrairement à la chaîne numérique avec le format ISO 6983 **[ISO82]** (Figure 28).

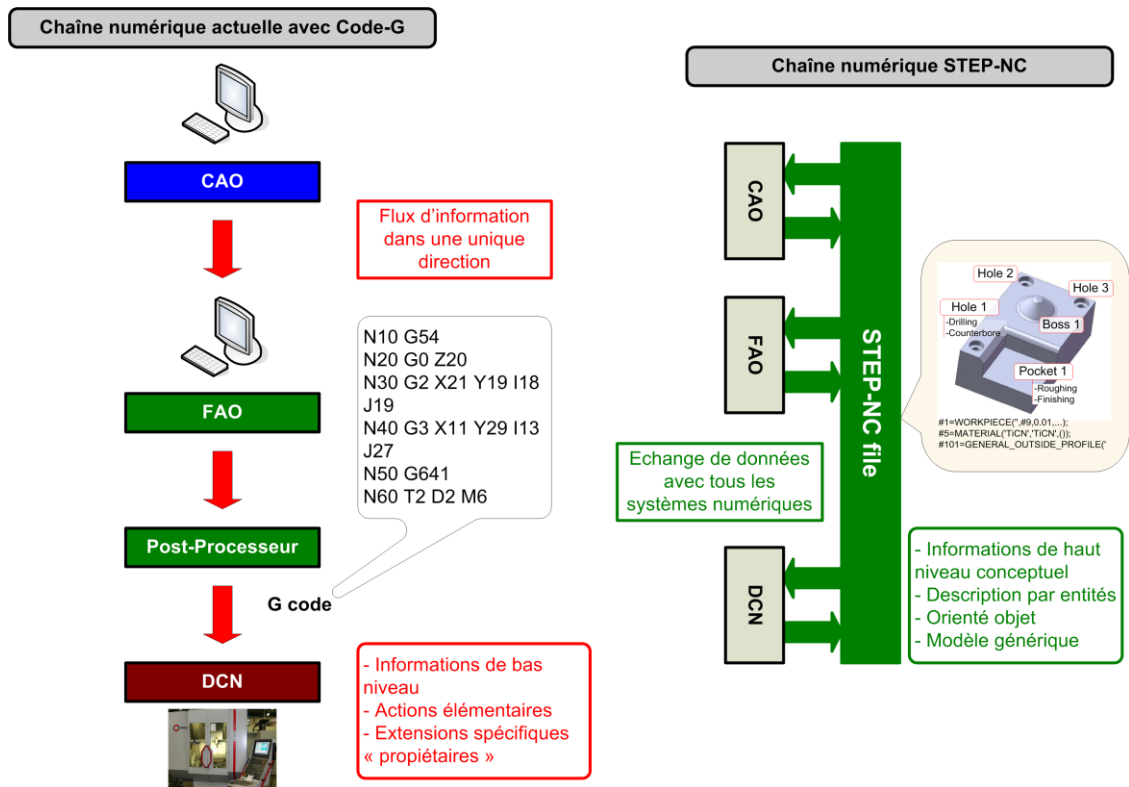


Figure 28 : Comparaison entre l'ISO 6983 [ISO82] et l'ISO 14649 [ISO03a]

Une autre caractéristique très intéressante du format STEP-NC [ISO03a] est qu'il n'a nul besoin d'opérations de post-processing. En effet, la portabilité du modèle permet au même modèle de données STEP-NC [ISO03a] d'être utilisé sur plusieurs machines de fabrication différentes sans changement. La transmission d'informations de haut niveau [STR06] est rendue possible par le fait que les pièces sont décrites par des entités de fabrication (« quoi faire »), et non de la manière dont il faut les fabriquer (« comment faire »), comme c'est le cas actuellement avec le format ISO 6983 [ISO82], en décrivant les trajectoires de l'outil (Figure 29).

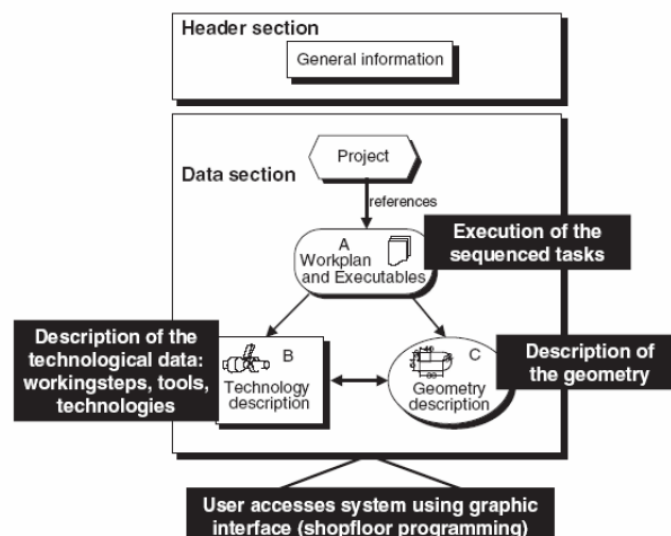


Figure 29 : Structure d'un fichier STEP-NC [ESP00]

La programmation STEP-NC étant orientée « objet », les fichiers STEP-NC sont divisés en plusieurs sections (voir Figure 30) : d'abord une section header où sont présentes les informations générales sur le projet de fabrication, puis une data section dans laquelle sont décrites les informations relatives à la technologie du procédé, la géométrie de la pièce, qui sont organisées dans le workplan (gamme de fabrication). La Figure 30 montre une description plus fine de l'organisation d'un fichier STEP-NC dans le langage de programmation de la norme STEP-NC qui est l'EXPRESS-G [SUH02b] [SUH03] [XU04]. Le fichier STEP-NC prend ensuite la forme d'un fichier texte tout comme les fichiers d'échange STEP présents dans les logiciels de CAO.

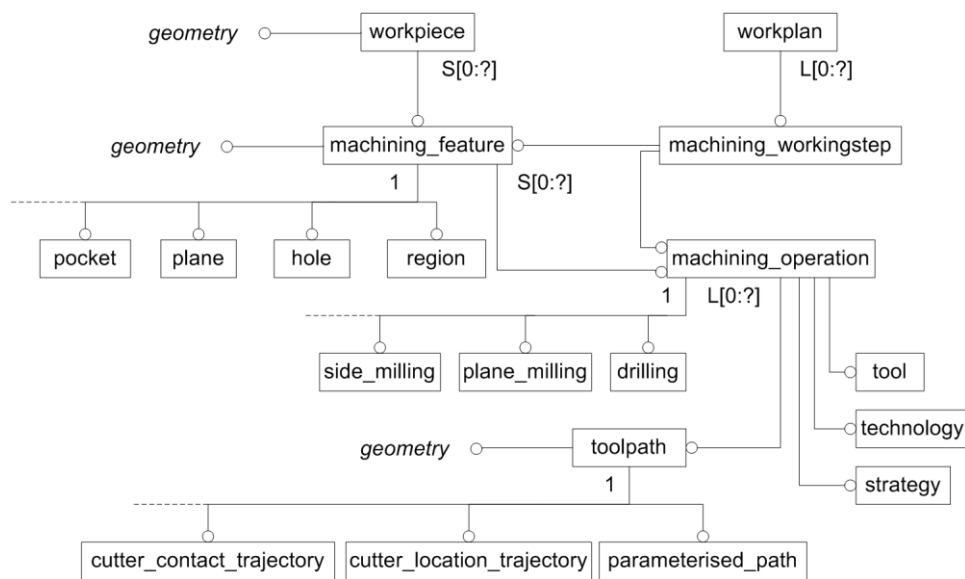


Figure 30 : Organisation d'un fichier STEP-NC [ESP00]

4.3.3 Description des pièces usinées dans la norme STEP-NC

La description de pièces fabriquées en usinage dans la norme STEP-NC est réalisée à l'aide d'entités d'usinage (fraisage, tournage...). Les entités de fraisage sont toutes décrites dans la part 10 [ISO04a] sous le nom de manufacturing_feature, les entités spécifiques au tournage (turning_feature) et à l'électroérosion (edm_feature) sont elles décrites dans les parties spécifiques de l'ISO 14649 part 12 [ISO04c] et parts 13 et 14 [ISO04d] [ISO04e]. Cette description est réalisée de la manière suivante : à partir d'un brut (Workpiece), les entités de fabrication sont soustraites de ce brut. Actuellement, dans la norme ISO 14649, 3 types de bruts sont disponibles : block (de type parallélépipédique) pour le fraisage, right_circular_cylinder (de type cylindre) pour le tournage et advanced_brep_shape_representation (de forme gauche) pour les bruts déjà préformés (par exemple un brut de moulage ou emboutissage). Une illustration de cette description est réalisée sur l'exemple simple de la Figure 31 suivante où est représenté un brut parallélépipédique dans lequel on vient réaliser une poche.

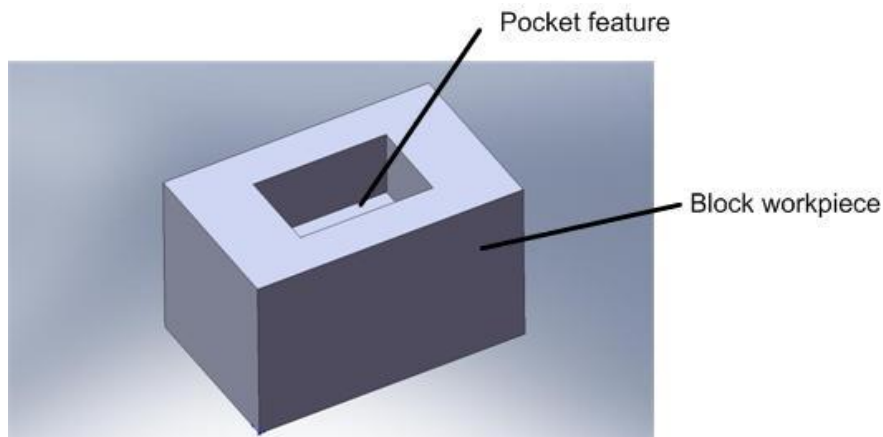


Figure 31 : Exemple d'une pièce avec poche

Le workpiece ainsi défini pour l'usinage ne peut être composé que d'un seul matériau avec les propriétés mécaniques qui lui sont propres.

A chacune de ces entités est associée une unique opération de fabrication, dans laquelle est définie la stratégie, l'outil utilisé, les paramètres de coupe... Ensuite les différentes opérations sont organisées en Workingstep (phase d'usinage, voir exemple Figure 32) et ces Workingsteps sont organisées dans le Workplan (gamme de fabrication).

La décomposition par entités et donc le workingstep n'est pas toujours unique (voir Figure 32).

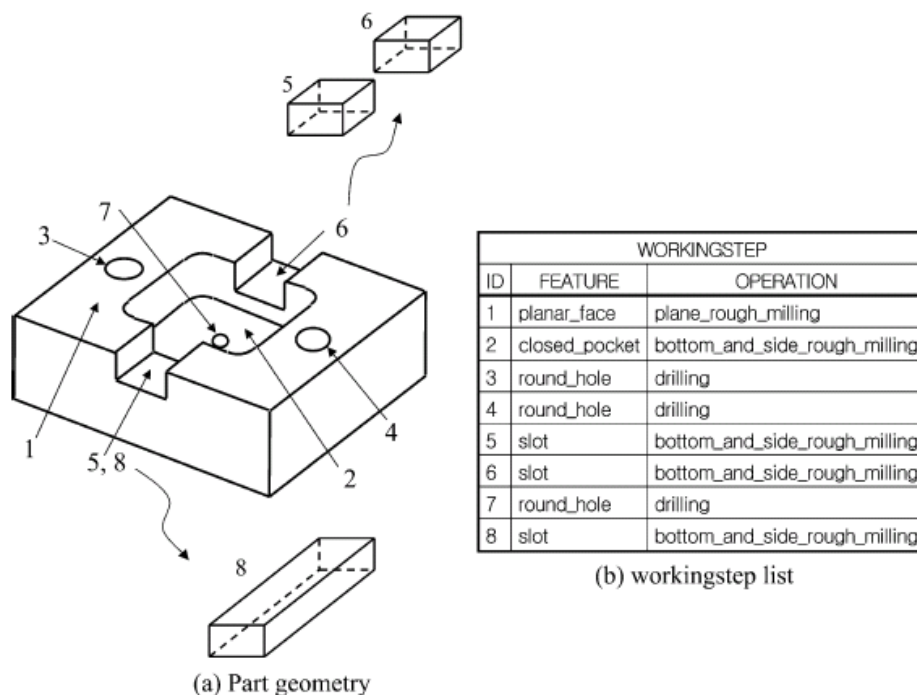


Figure 32 : Exemple d'une phase d'usinage sur une pièce

Pour le développement de la fabrication additive de nouvelles entités devront être développées. En effet, des formes classiques et facilement fabricables par ajout de matière ne sont pas décrites par les entités de l'AP-224 (par exemple les canaux conformes).

4.3.4 Synthèse bibliographique des travaux sur le format STEP-NC

Avoir une chaîne numérique complète et intégrée est l'un des points les plus importants des métiers de fabrication. Depuis qu'il est bien connu, le problème d'échange de données entre les systèmes de CFAO et les CN a une longue histoire. Plusieurs standards de données ont essayé de répondre à cette problématique depuis les années 70, mais se sont avérés inadéquats, comme l'IGES [IGE80], le XBF ou plus récemment les formats moins connus comme le PDDI ou le CAD*I. Ainsi, après toutes ces tentatives, le format STEP [ISO94a] (Standard for The Exchange of Product data model) a été développé dans l'optique de conservation de l'intégrité de la chaîne numérique, allant de la conception des produits jusqu'à leur fabrication. Jusqu'à il y a peu, le développement de ce nouveau standard, et plus particulièrement au niveau de l'ISO 14649, ne s'est fait que pour les procédés par enlèvement de matière (fraisage, tournage et électroérosion). Dans ce paragraphe, un état des lieux sur les différents travaux réalisés sur le STEP-NC est réalisé.

Xu et al. [XU05], dans leur article, passent en revue tous les travaux réalisés pour le développement de la norme STEP-NC. Plusieurs projets de recherche internationaux (européens, américains et coréens) ont été menés autour de cette thématique depuis les années 2000 et coordonnés par un projet de plus grande ampleur IMS (Intelligent Manufacturing Project).

Le projet IMS STEP-NC [MAE02], approuvé en Novembre 2001, a regroupé un ensemble d'actions de recherche au niveau international avec des laboratoires d'Europe, de Suisse, de Corée et des Etats-Unis. Les acteurs de ce projet étaient des utilisateurs, des fabricants de systèmes CAO, FAO, de machines outils et CN, ... Les coordinateurs régionaux étaient Siemens pour l'Europe, CADCAMation pour la Suisse, Step Tools pour les Etats-Unis et ERC-ACI pour la Corée. Siemens a aussi eu pour rôle la coordination internationale de ce groupe. Ce projet a représenté un point culminant quant au nombre de sous-projets qu'il a représenté au travers de 20 différents groupes de recherche. Il a notamment donné lieu au projet Européen Esprit STEP-NC, au projet Super Model, au projet SMS et RAMP qui vont être détaillés dans la suite de ce paragraphe.

Region	EU	Switzerland	Korea	USA
Technologies covered	Milling, Turning, Wood/glass cutting, Stone machining, Inspection	Wire/Sink EDM	Milling, Turning, Rapid Prototyping, XML-formatted STEP-NC data structure	AIM for Milling & Turning (STIX)
End user	<ul style="list-style-type: none"> • Daimler-Chrysler • Volvo • Franci (Italy) • Progetti 	<ul style="list-style-type: none"> • Derendinger • Wyss 	<ul style="list-style-type: none"> • Samsung 	IRB, including <ul style="list-style-type: none"> • Boeing • Lockheed Martin • General Electric • GDLS • General Motors...
Machine-tool manufacturer	<ul style="list-style-type: none"> • CMS (Italy) 	<ul style="list-style-type: none"> • AGIE • Starrag 		
Control manufacturer	<ul style="list-style-type: none"> • Siemens* • OSAI (Italy) • Fidia 			
CAM manufacturer	<ul style="list-style-type: none"> • Open Mind • Dassault 	<ul style="list-style-type: none"> • CADCAMation* 	<ul style="list-style-type: none"> • Cubictek 	<ul style="list-style-type: none"> • STEP Tools* • Gibbs & Associate • BA Solutions • Numerical Control Services • Louisiana Center for Manufacturing Sciences • Lawrence Livermore National Laboratories
Research institute	<ul style="list-style-type: none"> • WZL (RWTH AACHEN) • ISW (University of Stuttgart) 	<ul style="list-style-type: none"> • EPFL • EIG I-tech 	<ul style="list-style-type: none"> • ERC-ACI* • KIST 	
Association	<ul style="list-style-type: none"> • KTH • CECIMO (Belgium) 	<ul style="list-style-type: none"> • AMT 	<ul style="list-style-type: none"> • NRL-SNT 	<ul style="list-style-type: none"> • NIST • Department of Energy • Army's National Automotive Center (NAC)

Tableau 3 : Partenaires travaillant sur le projet IMS [XU03]

Le projet européen Esprit STEP-NC [ESP00] est né d'un ensemble de groupes de recherche créé au début des années 90 et ayant mené à la formation du consortium Européen STEP-NC, ce projet européen débute en janvier 1999 pour s'achever en décembre 2001. A l'origine, ce projet s'est intéressé au développement d'un prototype pour le fraisage, qui a été mis au point et présenté en Octobre 2001, à Aachen en Allemagne. Les modules CAO d'Open Mind (hyperfact) et de Dassault Système (Catia V5) ont permis de générer le programme STEP-NC. Ce programme a ensuite pu être exécuté par une CN Sinumeric 840D qui avait été adaptée dans ce but. Puis, les efforts se sont concentrés sur les mécanismes de retour d'information lors de la surveillance d'usinage.

Le projet américain Super Model a été fondé par le NIST (National Institute of Standards and Technology) et attribué en octobre 1999 à Step Tools Inc., en association avec d'autres entreprises collaboratrices. Le but de ce projet était de construire une base de données qui pourrait contenir l'ensemble des informations nécessaires à la fabrication de pièces. Les plus grandes firmes ont pris part au projet, comme par exemple Boeing, General Electrics, General Motors, Daimler-Chrysler, ... La base de données (des informations de fabrication) du projet super model s'appuie sur interface XML qui permet de relier trajectoires, outils, géométrie à usiner et phases d'usinage. Une autre bibliothèque de code libre nommée STIX a aussi été développée dans le but de regrouper les avantages des versions AIM (Application Interpreted Model) et ARM (Application Reference Model) du STEP-NC.

Le projet américain SMS (Stop Manufacturing Suite) est lui dédié à des applications commerciales et militaires. Ce projet est coordonné par le SCRA (South Carolina Research Authority) et est financé par l'US Army et sa branche TACOM (Tank-Automotive and Armament Command), ainsi que le National Automotive Center. Il s'appuie sur les concepts

développés par les pays ayant participé au groupe de travail TC 184 SC4 de l'ISO. Il a pour but d'implémenter l'architecture dans le cadre de la production des pièces en vue d'applications commerciales ou de défense.

Le projet américano-britannique RAMP (Rapid Acquisition of Manufactured Parts) a abouti au standard STEP 10303-224 **[ISO01]**, qui contient toutes les spécifications requises pour la fabrication d'un produit (entités, matériau, tolérancement...). Le protocole d'application 224 permet d'obtenir des spécifications de données de produit indépendantes du fournisseur qui comportent l'ensemble des informations nécessaires pour fabriquer et assembler des pièces. Il a tout d'abord été développé aux USA puis repris en Grande-Bretagne.

Toujours en Grande Bretagne, un projet débuté en mai 2004 et mené par le AMST Center de l'université de Loughborough vise à étendre les travaux de recherche européens en utilisant la commande numérique Siemens 840D à l'inspection et en particulier l'intégration du standard STEP-NC entre la MOCN et la machine à mesurer tridimensionnelle.

Le nombre de travaux de recherches ainsi que la diversité des équipes travaillant sur le sujet permet de dire que les travaux liés au STEP-NC bénéficient d'un élan international. Plusieurs projets réunissant industriels et universitaires travaillent à son développement. Tous ces acteurs sont réunis au niveau de la norme ISO dans les comités ISO TC 184/SC1 et ISO TC 184/SC4. Dans ce cadre l'IRCCyN a été sollicité pour travailler sur des thématiques liées à l'usinage **[LAG09a]** (trajectoires à motif en fraisage, développement d'une plateforme STEP-NC, multi-procédés...) et sur l'intégration de la fabrication additive **[HAS06a]** **[HAS06b]** **[HAS08]** **[RAU09a]** dans la norme STEP-NC. C'est la proposition de l'intégration de la fabrication additive dans la norme STEP-NC qui est présentée dans la suite de ce manuscrit.

4.3.5 Nouvelles possibilités avec le format STEP-NC

L'utilisation de l'ISO 14649 au niveau des directeurs de commandes numériques présente de nombreux avantages au niveau de la programmation. Suh **[SUH02b]** et Xu **[XU06a]** ont fait la synthèse de ces différents avantages. Les principaux points peuvent être résumés comme suit :

- *Programmation intelligente* : possibilité d'inclure dans le fichier STEP-NC les tolérances géométriques associées à chacune des entités. Possibilité de mesure de la pièce en temps réel et donc d'apporter des corrections en cours de fabrication.
- *Trajectoires exemptes d'interférence* : les trajectoires des outils sont générées directement par le DCN, à partir des informations fournies par le fichier STEP-NC.
- *Choix automatique des outils* : le choix des outils est aussi directement géré par le DCN, au moment de la génération des parcours outil.
- *Planification non linéaire du process* : le modèle STEP-NC ne définit qu'un ensemble d'opérations de fabrication (« workingsteps ») avec éventuellement des relations d'antériorité. Ensuite c'est le DCN lui-même qui organise la gamme de

fabrication. Ceci permet d'avoir une adaptation de la gamme en fonction des moyens de production disponibles.

Nous venons de voir toutes les avancées permises par la programmation STEP-NC. Son principal but est de voir émerger les DCN et machines de demain. Pour l'instant, toutes les attentes placées dans ce format ne sont pas complètement opérationnelles mais de nombreux travaux et projets internationaux y travaillent. Dans le paragraphe suivant ces principaux projets sont décrits.

4.3.6 STEP-NC et fabrication additive : évolution et perspectives

La définition d'une nouvelle chaîne numérique s'appuyant sur le format STEP-NC pour la fabrication rapide, nécessite des changements au niveau des machines de fabrication par ajout de matière. En effet, ces changements entraînent une migration des machines actuelles équipées avec des DCN « propriétaires » vers des DCN classiques déjà utilisés en usinage. C'est pourquoi une impulsion doit être donnée pour commencer une migration vers l'utilisation de DCN classique au niveau des machines de fabrication rapide.

Ces changements vont permettre de pouvoir définir de nouveaux objectifs pour les machines de fabrication rapide utilisant des DCN génériques [MEK08] :

- *Meilleure maîtrise du procédé* : possibilité de développements et contrôles de nouvelles stratégies, trajectoires... Meilleur réglage des paramètres de fabrication avec l'intégration dans la chaîne numérique d'une solution FAO robuste.
- *Flux de données bidirectionnels* : définition d'une chaîne numérique aux flux de données bidirectionnels pour augmenter l'échange de données entre la CAO-FAO-DCN.
- *Simulation* : intégration de modules de simulation, qui peuvent par exemple détecter les collisions ou simuler les trajectoires des sources d'énergie (laser, EBM...).
- *Suivi de fabrication* : définition et développement d'une solution au niveau du DCN pour le suivi et le contrôle du procédé, des outils et de la pièce. Ce genre de solution permet l'inspection du procédé en cours de fabrication et la compensation des erreurs de fabrication.
- *Optimisation du procédé* : optimisation du procédé de fabrication additive en utilisant le retour d'information au niveau du DCN.
- *Adaptabilité* : ce type de DCN plus ouvert déjà utilisé sur les machines d'usinage peut facilement être installé sur des machines de fabrication rapide de nouvelle génération.
- *Interopérabilité et portabilité* : meilleur échange des données entre les différents acteurs de la chaîne numérique, et possibilité de changement de machine de fabrication additive sans retraitement des données de conception et fabrication.
- *Multi-procédé* : ce type de chaîne numérique avec l'utilisation de DCN ouvert n'est pas dédié à l'utilisation d'un seul procédé, et son utilisation pour la réalisation de pièces multi-procédés peut être envisagé.

Ces machines de demain utilisant des DCN génériques pourront donc être pleinement intégrées dans une chaîne numérique complète utilisant le standard de données STEP-NC. Pour cela, un nouveau modèle de données STEP-NC pour la fabrication additive doit être défini. Comme montré précédemment sur la figure 13, Lee et al. [LEE03] ont proposé pour la première fois une introduction concrète des procédés par ajout de matière dans la norme ISO 14649 (STEP-NC), au même niveau que les procédés par enlèvement de matière dans les futures technologies. Il a donc été proposé récemment par le comité de l'ISO TC184/SC1 d'introduire les procédés de fabrication rapide à ce niveau là dans une nouvelle part : 17 (données spécifiques aux procédés de fabrication additive).

Ce nouveau modèle de données sera décrit dans le chapitre 4 de ce manuscrit. Il devra intégrer tous les paramètres inhérents à la fabrication additive et s'intégrer parfaitement à l'ISO 14649. Pour cela, de nouvelles entités de fabrication additive devront être intégrées. Ensuite, dans le chapitre 5, une illustration sera faite avec une proposition de plateforme STEP-NC pour la fabrication additive.

4.4 Plateformes STEP-NC développées à travers le monde

4.4.1 L'intégration du standard STEP-NC sur des machines de fabrication

La diffusion rapide de machines équipées avec des directeurs de commande numérique STEP-NC ne peut être envisagée. En effet, cela entraînerait de très lourds investissements et la mise à jour de tout le parc machine des industriels et leurs solutions logicielles. Comme le montre R. Laguionie [LAG08], ces évolutions de programmation au niveau des DCN peuvent être envisagées en trois étapes, pour arriver à une programmation avancée (voir Figure 33).

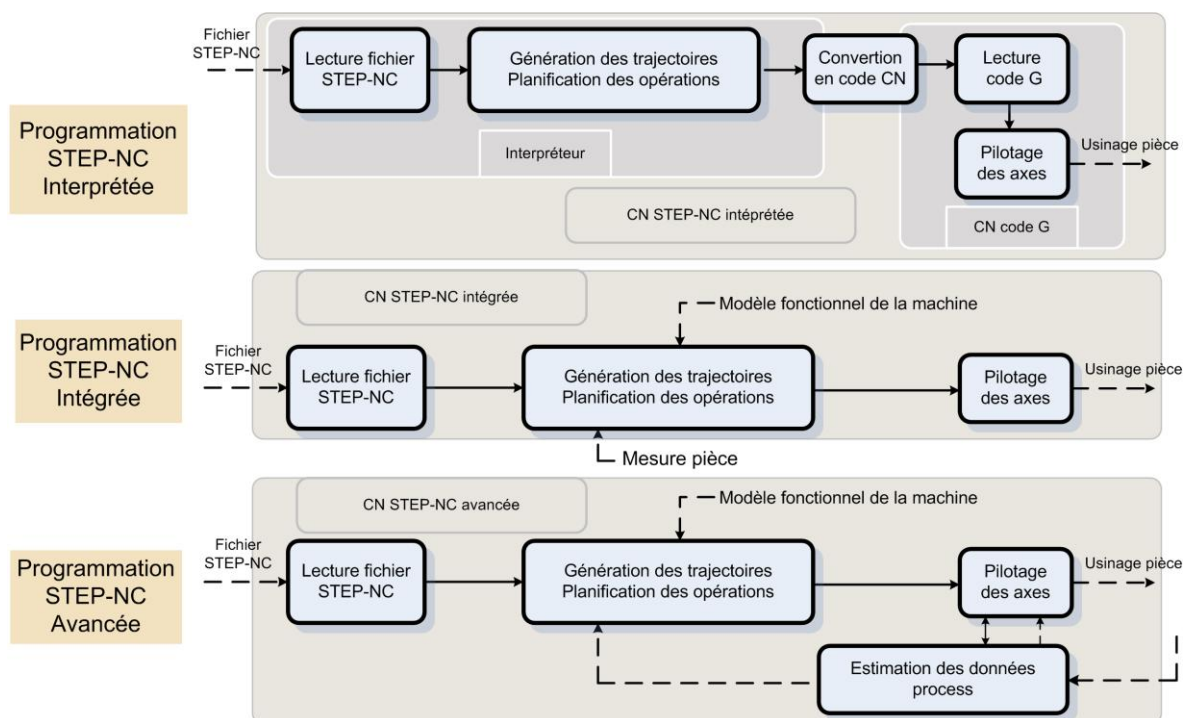


Figure 33 : Différentes étapes avant une programmation avancée [LAG09b]

La première étape consiste en une programmation STEP-NC interprétée. Cette programmation s'appuie toujours sur le code-G pour pouvoir s'adapter aux machines-outils industrielles existantes. L'emploi du code est en revanche complètement transparent pour l'utilisateur. Le principal avantage de cette programmation est de rapidement mettre en œuvre la programmation STEP-NC, mais certaines possibilités du STEP-NC ne peuvent être exploitées.

La deuxième étape est une programmation complètement intégrée qui ne fait plus appel au code-G. C'est l'ultime étape avant la programmation avancée qui permet l'optimisation et la simulation du process via des modules intégrés directement au directeur de commande numérique. Ce type de programmation permettra à terme l'optimisation temps réel des procédés avec une adaptation des trajectoires et paramètres de fabrication.

Plusieurs équipes de recherche travaillant sur le standard de données STEP-NC ont développé des plateformes d'usinage STEP-NC. Un état de l'art de ces travaux est réalisé dans le paragraphe suivant.

4.4.2 Etat de l'art des plateformes STEP-NC existantes

La première catégorie de prototypes, utilisant du STEP-NC interprété, nécessite encore l'emploi du code G pour exécuter les résultats de l'interpréteur STEP-NC. Les premiers travaux ont été effectués dans le cadre du projet européen ESPRIT **[ESP00]**. La solution était basée sur le logiciel de CFAO Catia et Open Mind, qui permettent de générer directement un fichier STEP-NC et donc d'intégrer ce standard dans une suite CAO/FAO directement sur un DCN classique **[WEC01]** (ici siemens 840D). L'entreprise STEP Tools **[STE]** développe le logiciel (ST machine) permettant de générer et traiter un modèle STEP-NC ISO 10303-238. Comme sur une interface de commande numérique, il importe le modèle CAO et les trajectoires outil dans un format générique. Ces données sont ensuite converties en STEP-NC AP 238. Bien qu'utilisant un format générique, de nombreuses possibilités prévues par l'ARM (ISO 14649) ne sont pas utilisables. Un autre interpréteur a été développé à l'université de Loughborough et permet de traduire un fichier STEP-NC en code G pour des opérations d'usinage **[NEW03]**.

La deuxième catégorie de prototypes, utilisant du STEP-NC intégré, qui est plus évoluée permet elle de s'affranchir du code-G. L'équipe du Professeur Suh du laboratoire PosTech en Corée a développé un système de contrôle autonome basé sur plusieurs modules indépendants (module de génération du fichier STEP-NC, générateur de trajectoires, module de visualisation, module de commande et de contrôle des axes machine). Ce prototype a ouvert la voie du contrôle d'axes machine directement à partir du fichier STEP-NC. Ce prototype a mené à la réalisation de maquettes en tournage ou fraisage **[SUH02b] [SUH03] [SUH06]**. Un autre prototype a été présenté à l'université d'Auckland et pose les bases d'une architecture CN complète dédiée aux applications de fraisage sans l'utilisation de code-G **[XU06b]**.

Malgré la diversité des prototypes développés, il demeure toujours un manque de solutions réelles pour l'implémentation et le traitement de fichier STEP-NC ISO 14649 au cœur des CN actuelles. Des plateformes de développement sont indispensables pour implémenter et valider les nouvelles propositions et optimisations des outils de

programmation avancée. Dans ce cadre, l'architecture d'une plateforme STEP-NC pour la fabrication additive répondant à ces critères est présentée dans le paragraphe suivant.

4.5 Conclusion

Le standard STEP est un standard de données intéressant pour la chaîne numérique en fabrication. En effet, celui-ci répond bien aux enjeux d'interopérabilité et de conservation des données d'un projet de fabrication.

Plus particulièrement, au niveau du directeur de commande numérique, le format STEP-NC bénéficie d'un élan international, et les premiers résultats convaincants apparaissent au niveau de l'usinage. Ainsi, des modèles de données ont été développés pour le fraisage et le tournage. Des plateformes STEP-NC pour l'usinage développées par différents laboratoires internationaux sont également opérationnelles.

De son côté, la fabrication additive souffre d'un retard important au niveau de la qualité de sa chaîne numérique, avec l'utilisation d'un standard de données de bas niveau conceptuel. Le format STEP-NC est une solution intéressante pour être le nouveau standard de données des procédés de fabrication par ajout de matière. Ces procédés doivent donc prendre le train en marche et profiter de l'élan international initié sur les procédés d'usinage. Pour cela un nouveau modèle de données STEP-NC pour la fabrication additive doit être proposé et une mise en application réalisée sur une plateforme STEP-NC fabrication additive.

5. Problématique de nos travaux de recherche

Nos travaux s'intéressent à la chaîne numérique des procédés de fabrication par ajout de matière. Nous avons vu dans le premier chapitre l'importance pour un procédé de fabrication d'avoir une chaîne numérique performante pour se développer.

Cette analyse nous a conduits à proposer une méthodologie pour l'obtention d'une nouvelle chaîne numérique performante en fabrication additive. Pour cela, nous avons mis en avant la nécessité d'avoir un modèle complet de description de ces procédés. Notre étude bibliographique réalisée dans la première partie de ce chapitre, nous a permis de mettre en évidence qu'un tel modèle n'existait pas pour le moment. Nous développerons donc dans le prochain chapitre un nouveau modèle de données qui s'appuiera sur les modèles de données partiels déjà développés dans la littérature et étudiés dans la première partie.

L'étude bibliographique effectuée dans la deuxième partie sur le format STEP et plus particulièrement sur le format STEP-NC a permis de mettre en évidence que ce dernier présentait des caractéristiques intéressantes pour être le standard de haut niveau conceptuel de la chaîne numérique des procédés de fabrication par ajout de matière. En effet, il répond aux nombreuses exigences pour un standard de données mises en avant dans le chapitre 1. C'est de plus, un standard intéressant car il intègre une programmation basée entité, qui peut évoluer facilement.

Notre nouveau modèle de description des procédés de fabrication par ajout de matière devra donc être un modèle exhaustif, hiérarchisé et qui s'appuie sur une description par entités. Son intégration dans la norme STEP-NC (ici simple outil de standardisation) sera ainsi facilitée.

Chapitre 3

Nouveau modèle hiérarchisé d'organisation des données numériques

1. Introduction

Ce chapitre présente la mise en place d'un nouveau modèle hiérarchisé des données pour les projets de fabrication additive. Ce nouveau modèle correspond à l'étape 2 de la méthodologie générale présentée dans le chapitre 1 de ce manuscrit.

La première partie de ce chapitre consistera à la présentation de ce nouveau modèle complet de description des procédés de fabrication par ajout de matière. Nous présenterons tout d'abord les objectifs de ce modèle hiérarchisé des données. Puis, nous montrerons pourquoi le modèle que nous proposons est innovant. Ensuite, nous présenterons notre méthode pour la structuration et l'obtention de ce modèle complet et hiérarchisé. Puis, nous montrerons en quoi une structure basée entités répond à nos objectifs pour la réalisation de notre modèle. Enfin, nous montrerons en quoi ce modèle contribue à notre problématique d'intégration des procédés de fabrication additive dans un standard de données de haut niveau conceptuel.

Dans une deuxième partie, le modèle complet sera présenté. Au vu de la multitude des données nécessaires à la description d'un projet de fabrication additive, nous montrerons quel formalisme nous avons mis en place pour obtenir ce modèle complet. Une fois ce formalisme présenté, nous détaillerons chacune des étapes du modèle hiérarchisé des données.

Notre troisième partie nous permettra de présenter un exemple d'illustration du fonctionnement de ce modèle hiérarchisé. Cet exemple s'appuie sur une pièce-test et une machine de projection de poudre de l'IRCCyN.

Enfin en dernière partie, nous montrerons quels sont les apports pour la fabrication additive de la mise en place d'un tel modèle complet et hiérarchisé des données de fabrication additive. Cela, nous permettra de montrer l'importance de la proposition d'un tel modèle avant la proposition d'une nouvelle chaîne numérique, pour les procédés de fabrication par ajout de matière, basée sur un standard de haut niveau conceptuel.

2. Nouveau modèle de description des données

2.1 Objectifs généraux

Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, aucun modèle complet de description des procédés de fabrication additive n'a été développé dans la littérature. Pour une meilleure connaissance, et à terme intégration, de ces procédés dans un standard de haut niveau conceptuel, la proposition d'un tel modèle est importante. C'est pourquoi dans la suite de ce chapitre, nous allons proposer un modèle complet pour les procédés de fabrication par ajout de matière.

L'objectif de ce modèle complet de description des procédés de fabrication additive est d'avoir une vue d'ensemble précise de ces procédés. Il est important qu'au sein de ce modèle, tous les procédés de fabrication additive puissent être décrits ainsi que toutes les informations nécessaires à la réalisation d'un projet de fabrication additive.

Par ailleurs le nouveau modèle de description que nous proposons ici doit être un modèle générique et évolutif. En effet, celui-ci devra à terme pouvoir être intégré dans n'importe quel standard de données. Enfin le modèle complet et hiérarchisé que nous proposons doit répondre aux contraintes suivantes :

- Il doit être hiérarchisé et indépendant de tout standard de données.
- Il intègre des données de haut niveau conceptuel.
- Il est intégré dans un environnement numérique générique.
- Il doit être le plus exhaustif possible.
- Il doit pouvoir évoluer et incorporer de nouvelles informations, si par exemple de nouvelles technologies de fabrication additive voient le jour.
- Il doit être générique et adapté à tous les procédés par ajout de matière (métalliques, plastiques...).
- Il doit avoir une programmation la plus facile possible avec une organisation structurelle des données.

La première phase pour la proposition d'un nouveau modèle de description des procédés de fabrication par ajout de matière est l'identification des principales informations qui composent le modèle hiérarchisé. Ces principales informations sont identifiées dans le paragraphe suivant, à partir des données étudiées dans l'état de l'art réalisé au chapitre 2, ainsi que les besoins inhérents à la réalisation d'un projet de fabrication additive.

2.2 Un modèle innovant pour la gestion des données en fabrication additive

Le modèle de données qui est mis en place dans ce chapitre se veut être un modèle innovant. En effet, celui-ci permet de modéliser tous les types de projet de fabrication additive indépendamment de la technologie utilisée. En outre, ce modèle est aussi hiérarchisé ce qui permet d'avoir une modélisation ordonnée du projet.

Avant d'arriver à un modèle hiérarchisé des données, comme l'indique la méthode que nous proposons à la Figure 35, il est important d'identifier toutes les données qui vont

composer ce modèle. C'est ainsi que nous avons pu recenser, à partir de l'étude bibliographique réalisée au chapitre 2 sur les procédés de fabrication additive, sept types de données principales :

- Les données sur la machine.
- Les données sur la préparation de la fabrication.
- Les données sur le projet en général.
- Les données sur la fabrication.
- Les données sur la post-production.
- Les données sur la pièce.
- Les données sur le programme.

Comme présenté sur la Figure 34, toutes ces informations composent le modèle complet et devront être intégrées par la suite dans un modèle standardisé des données.

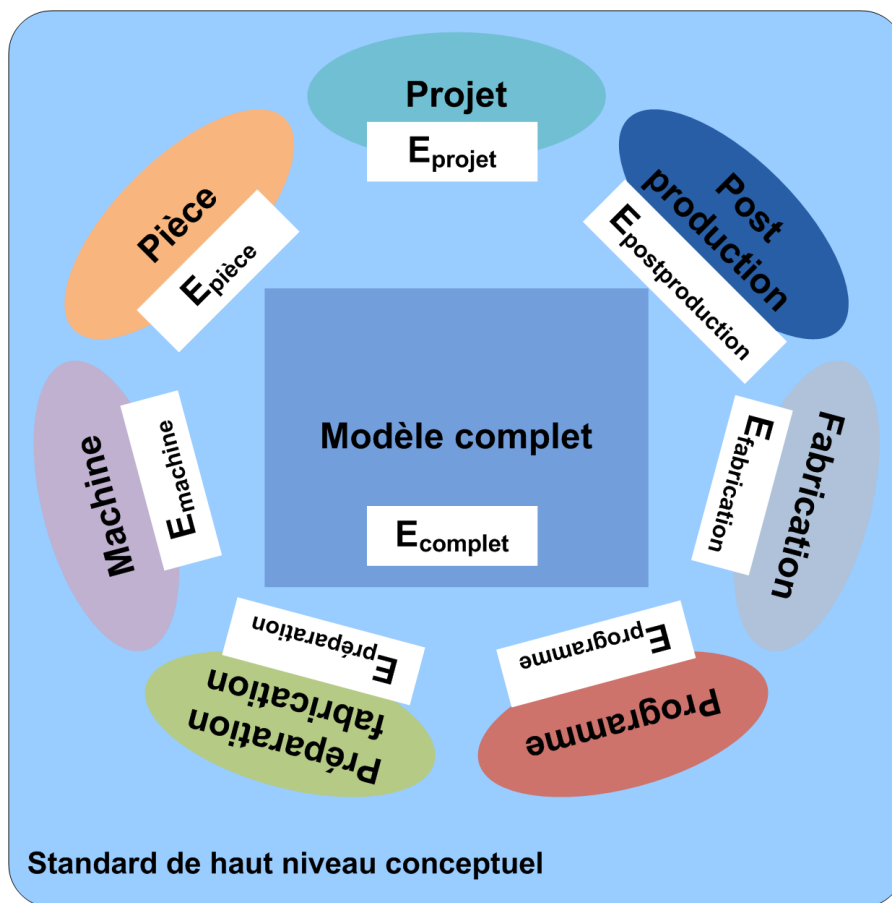


Figure 34 : Principales informations d'un projet de fabrication additive

On peut mathématiser le modèle complet de description des procédés de fabrication additive de la manière suivante :

$$E_{complet} = E_{projet} + E_{pièce} + E_{machine} + E_{préparation} + E_{programme} + E_{fabrication} + E_{post-production}$$

Maintenant que les principales données qui composent un projet de fabrication par ajout de matière ont été identifiées, nous allons proposer une méthodologie au paragraphe suivant pour hiérarchiser et ordonner ces données dans un modèle organisé par niveaux.

Chaque niveau regroupera en son sein les principales informations d'un projet de fabrication additive, ainsi notre modèle sera composé de sept niveaux.

2.3 Structuration des données

Le modèle que nous proposons dans ce chapitre constitue l'étape 2 de notre méthodologie générale (présentée au chapitre 1). Il est important que ce modèle regroupe toutes les informations nécessaires à la réalisation d'un projet de fabrication additive. Pour arriver à ce résultat, nous avons mis en place une méthode pour la proposition de ce modèle (Figure 35).

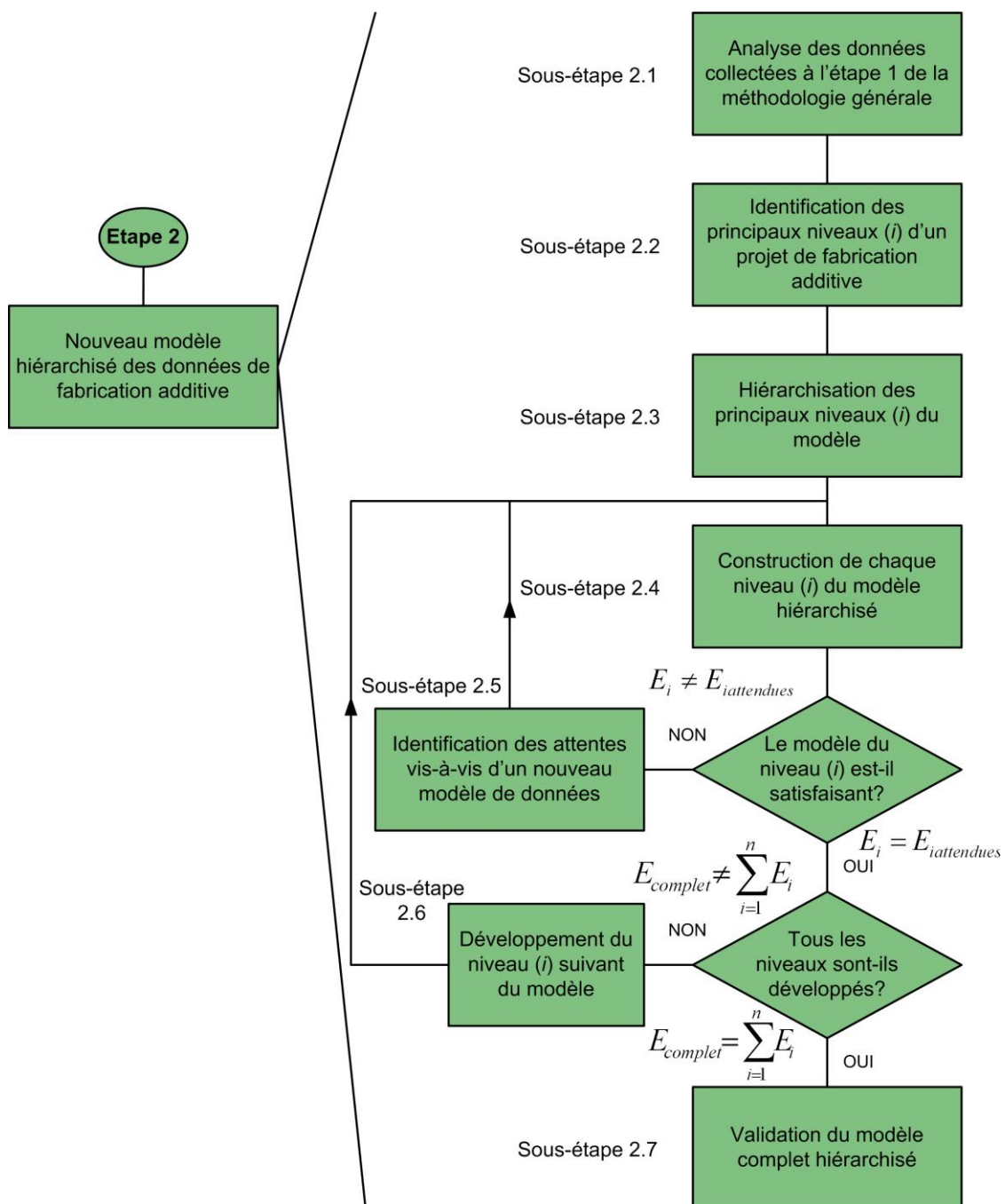


Figure 35 : Méthode d'obtention d'un modèle hiérarchisé des données de fabrication additive

La première sous-étape (2.1) de la méthode consiste à identifier toutes les informations nécessaires à la réalisation d'un projet de fabrication additive. Ces informations sont issues de la bibliographie réalisée dans le chapitre 2 de ce manuscrit, mais aussi des nouveaux besoins des procédés de fabrication additive, vis-à-vis de leurs évolutions ces dernières années (nouvelles technologies, nouveaux matériaux...).

A partir de ces informations les sous-étapes 2.2 et 2.3 de la méthodologie permettent d'identifier les principaux niveaux (*i*) de notre modèle et ensuite de les hiérarchiser. Les principaux niveaux (*i*) du modèle hiérarchisé constituent l'ossature de notre modèle complet.

Les trois sous-étapes suivantes (2.4, 2.5 et 2.6) de notre méthodologie permettent elles de construire en détail notre modèle hiérarchisé complet. A la sous-étape 2.4, nous construisons chaque niveau de notre modèle complet. Cette sous-étape consiste en l'organisation et la hiérarchisation des données identifiées à l'étape 1 de la méthodologie générale, pour chaque partie du modèle complet. La sous-étape 2.5 va consister en une vérification des informations intégrées au niveau *i* du modèle complet (E_i), par rapport aux informations attendues à ce niveau ($E_{i\text{attendues}}$). Si ces deux types d'informations sont différents, alors on ré-exécute la sous-étape 2.4 en ayant auparavant réexaminé les attentes du modèle par rapport au modèle obtenu. Ensuite, à la sous-étape 2.6, on vérifie si on a bien développé tout le modèle (si tous les niveaux ont été réalisés), c'est-à-dire si : $E_{\text{complet}} = \sum E_i$. Si ce n'est pas le cas, le niveau *i* suivant est à son tour développé et on réexécute la méthode depuis la sous-étape 2.4. Lorsque cette condition est respectée, la dernière sous-étape (2.7) permet après la définition de toutes les parties du modèle complet et hiérarchisé de valider le modèle complet.

Dans le paragraphe suivant, nous allons voir quel type de structuration des données va nous permettre dans la suite de ce chapitre de définir notre nouveau modèle des données tout en répondant aux objectifs énoncés auparavant.

2.4 Modèle hiérarchisé basé entités

Les principaux objectifs de notre modèle complet et hiérarchisé sont : d'avoir une structure évolutive, d'être facilement programmable et d'avoir une organisation structurée des données. Nous proposons donc que notre modèle hiérarchisé des données soit un modèle basé entités. En effet une description basée entités permet plus facilement d'avoir un modèle évolutif. L'enrichissement du modèle avec de nouvelles entités n'entraîne pas la remise en question du modèle complet. Cela permet un travail collaboratif, auquel chaque spécialiste d'un domaine peut apporter son expertise à travers la proposition d'une ou plusieurs entités, dont il a besoin. Par ailleurs une telle description permet plus facilement de hiérarchiser les données, en pouvant intégrer des hiérarchies entre les différentes entités du modèle (classes d'entités, sous classes...).

De plus, ce modèle hiérarchisé basé entités se veut être une étape préliminaire à l'intégration des procédés de fabrication additive dans un standard de haut niveau conceptuel. Sa structure basée entité lui permettra d'être plus facilement intégré dans un standard dont la programmation est basée entités. En outre sa structure hiérarchisée facilitera également la proposition d'un nouveau standard, les principales interactions et ordres hiérarchiques entre les données étant déjà définis.

Enfin sa structure générique basée entité lui permet d'être indépendant de tout langage de programmation de standards quels qu'ils soient. Plusieurs avantages en découlent. Tout d'abord, ce modèle peut servir de support d'organisation, de structuration ou de gestion des données pour plusieurs standards. D'autre part, des évolutions au niveau de la structuration des données du standard de données choisi pour l'intégration des procédés par ajout de matière ne remettent pas en cause notre modèle.

2.5 Apports de ce nouveau modèle

Ce modèle a aussi pour vocation d'apporter une réponse aux défauts actuels de la chaîne numérique des procédés de fabrication additive. Ainsi, ce modèle complet devra parfaitement s'intégrer dans un espace numérique de haut niveau conceptuel. De plus cet environnement numérique devra être le plus générique possible pour ne pas dépendre de solutions « propriétaires » beaucoup plus contraignantes en termes de possibilité de développements et d'échanges de données.

Ce nouveau modèle doit aussi au travers d'une nouvelle chaîne numérique basée sur un standard de données répondre aux enjeux d'interopérabilité et de portabilité des données qui sont les principaux défauts du modèle actuel. Ainsi comme on peut le voir sur la Figure 36, ce modèle doit pouvoir être adapté sur tous les types de machines de fabrication additive, indépendamment du constructeur ou du type de technologie utilisée.

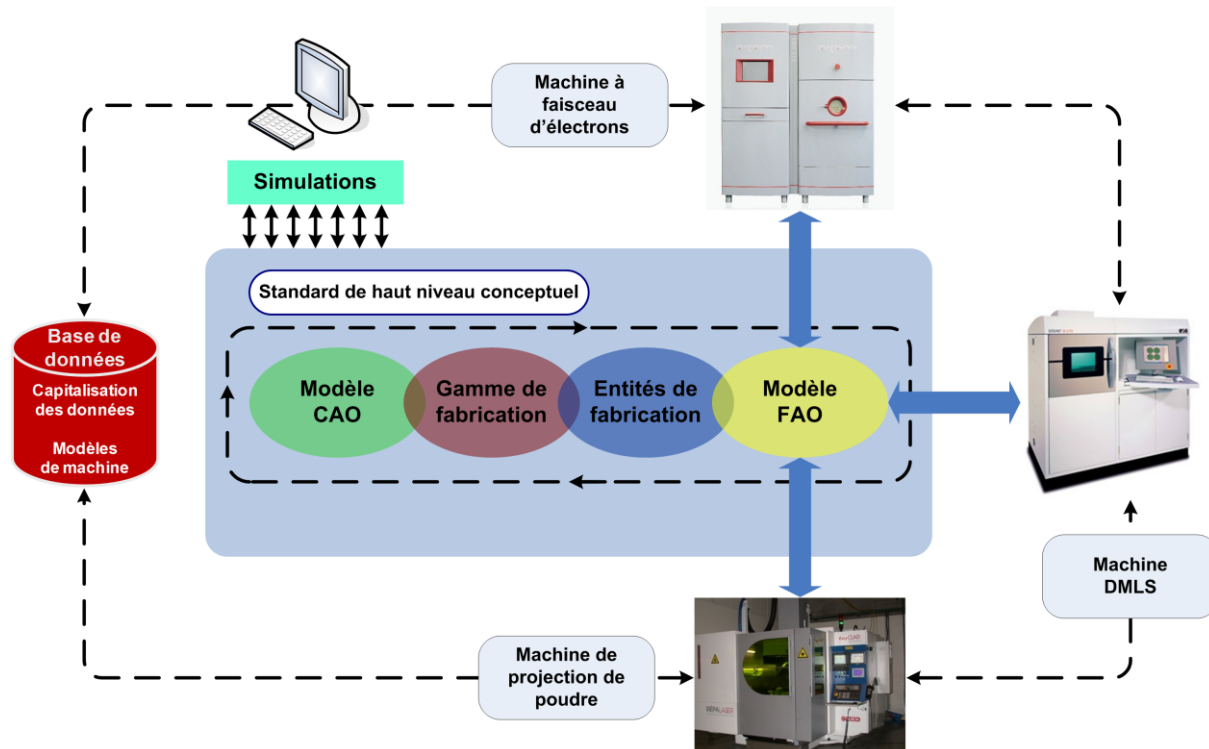


Figure 36 : Environnement numérique d'un projet de fabrication additive

Le modèle complet et hiérarchisé, que nous proposons dans ce chapitre, s'intéresse à la structuration et l'organisation des données numériques pour la réalisation d'un projet de fabrication additive. Ces données ne composent pas l'environnement numérique d'un projet de fabrication par ajout de matière dans son ensemble. En effet, un autre aspect est le

matériel numérique qui regroupe les directeurs de commandes numériques, les logiciels de CFAO, et les moyens de métrologie ou de finition (voir Figure 37). Les données numériques et le matériel numérique sont intimement liés. C'est pourquoi une évolution de l'un des deux entraînera inévitablement des changements profonds sur l'autre, pour que les utilisateurs puissent bénéficier des dernières évolutions. Ainsi, le modèle que nous proposons ici nécessitera des changements au niveau des équipements numériques (DCN, systèmes de CFAO...) actuellement utilisé en fabrication additive. Nous proposerons donc dans ce manuscrit nos réflexions et propositions pour l'évolution du matériel numérique en fabrication additive pour être en adéquation avec notre modèle hiérarchisé des données numériques.

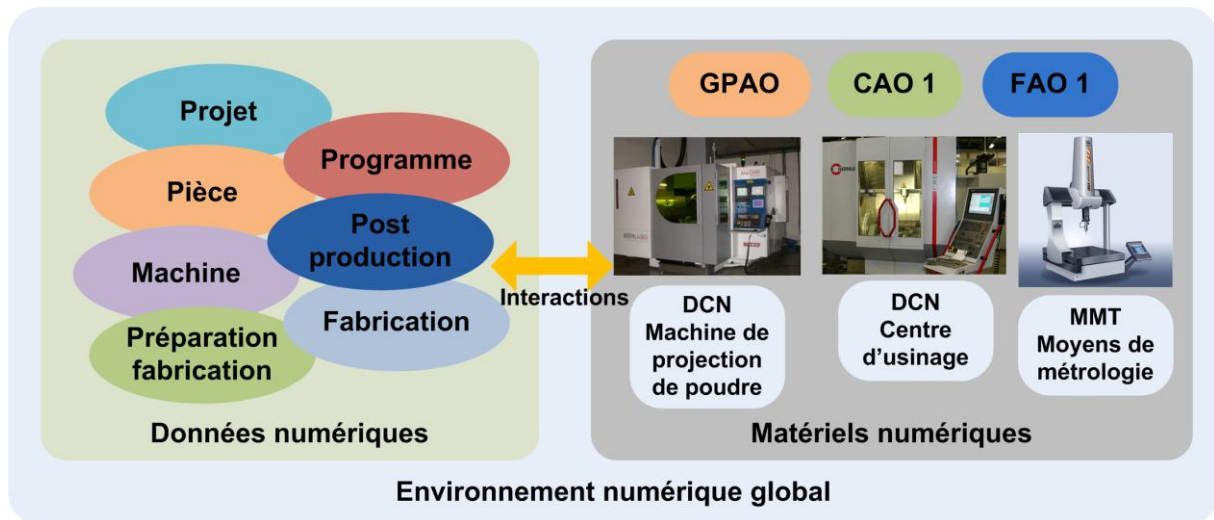


Figure 37 : Organisation de l'environnement numérique global en fabrication additive

3. Le modèle hiérarchisé des données des procédés d'ajout de matière

3.1 Présentation

Dans cette partie, nous allons présenter dans le détail le nouveau modèle complet et hiérarchisé des données de fabrication additive. Ce modèle correspond à l'étape 2 de notre méthodologie générale présentée dans le chapitre 1 de notre manuscrit, pour l'obtention d'une nouvelle chaîne numérique en fabrication additive. Les données et leur structuration intégrées dans ce modèle constituent les données d'entrée pour la proposition d'intégration des procédés de fabrication par ajout de matière dans un standard de données de haut niveau conceptuel.

Dans la suite de ce chapitre, les résultats obtenus à partir de la méthodologie mise en place à la Figure 35 (étape 2 de la méthodologie générale du chapitre 1 détaillée) vont être présentés. Le but est d'obtenir un nouveau modèle innovant, complet et exhaustif pour les procédés de fabrication par ajout de matière. La finalité de ce modèle est de décrire toutes les informations qui doivent être renseignées lors de la réalisation d'un projet de fabrication additive. Nous allons par conséquent ordonner et hiérarchiser entre elles toutes les données nécessaires à ces procédés, dans le but de ne pas en oublier pour la future standardisation de ces procédés.

Nos travaux sur ce modèle nous ont permis de mettre en évidence trois grandes parties parmi les sept niveaux de notre modèle lors de la réalisation d'un projet de fabrication par ajout de matière : la *description de l'espace de travail*, le *réglage des paramètres et le programme CN* et enfin la *fabrication* et la *post-production*. On retrouve cette organisation sur la Figure 38 sur laquelle notre modèle hiérarchisé est décrit.

Ce modèle a été construit avec l'intention d'être à la fois exhaustif, pour avoir déjà le maximum d'informations sur les procédés par ajout de matière, mais aussi évolutif, pour avoir la possibilité d'accueillir de nouvelles données en son sein lorsque de nouvelles machines et/ou technologies verront le jour dans le futur.

Dans la suite de ce chapitre, les différents niveaux du modèle hiérarchisé sont présentés et justifiés. De plus, les nouveaux concepts introduits par ce modèle, par rapport aux modèles existants décrits précédemment, seront mis en avant et justifiés avec les nouveaux besoins des utilisateurs de procédés par ajout de matière.

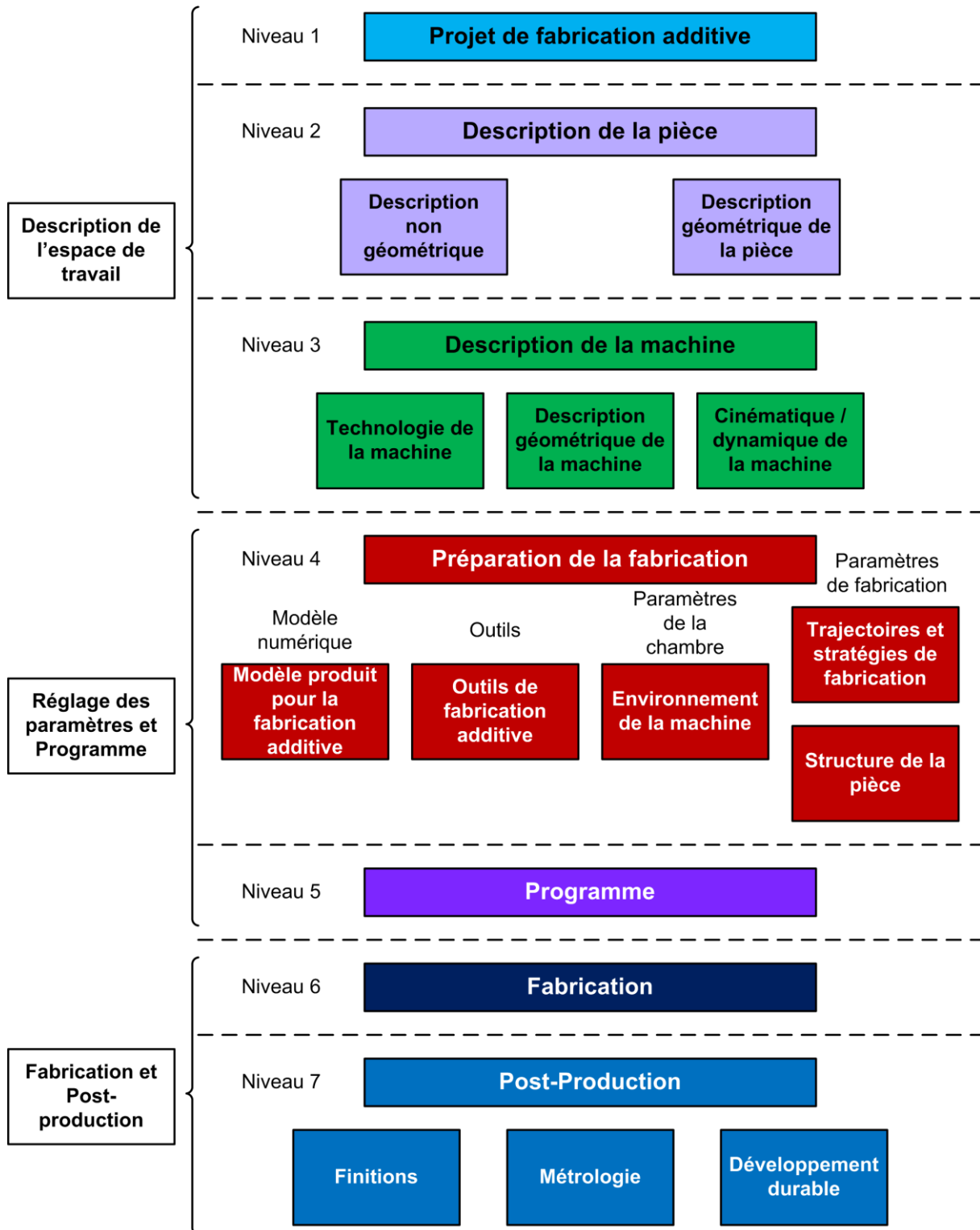


Figure 38 : Modèle hiérarchisé des données de fabrication additive

3.2 Organisation du modèle

Le modèle que nous proposons est un modèle basé entités. Les entités de notre nouveau modèle doivent donc être organisées et hiérarchisées les unes par rapport aux autres. Nous avons donc mis en place une structuration des données au sein de notre

modèle qui le permette. Une définition de cette structuration est faite dans la suite de ce paragraphe.

Notre modèle est un modèle basé sur une analyse descendante. Il se lit de la gauche vers la droite, les entités étant les plus à gauche étant hiérarchiquement de niveau supérieur aux autres (voir Figure 39). De plus, une entité peut être de niveau hiérarchique supérieur pour plusieurs entités. Cela se modélise par des divergences, qui peuvent être de trois types : divergence en ET (&) (toutes les entités de niveau hiérarchique inférieur doivent être renseignées), divergence en OU (≥ 1) (1 ou plusieurs entités de niveau hiérarchique inférieur doivent être renseignées) ou divergence en OU exclusif (=1) (seulement une entité de niveau hiérarchique inférieur doit être renseignée). Par ailleurs, certaines entités peuvent être optionnelles, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas forcément renseignées (représentation en pointillés). Enfin, on peut distinguer deux types d'entités, les entités qui sont des entités mères et les entités définissant des valeurs ou des identifiants. Ces deux types d'entités peuvent être distingués (exemple de la Figure 39) par une représentation dans un rectangle pour les entités mères et un rectangle à bords arrondis pour les entités renvoyant à des valeurs.

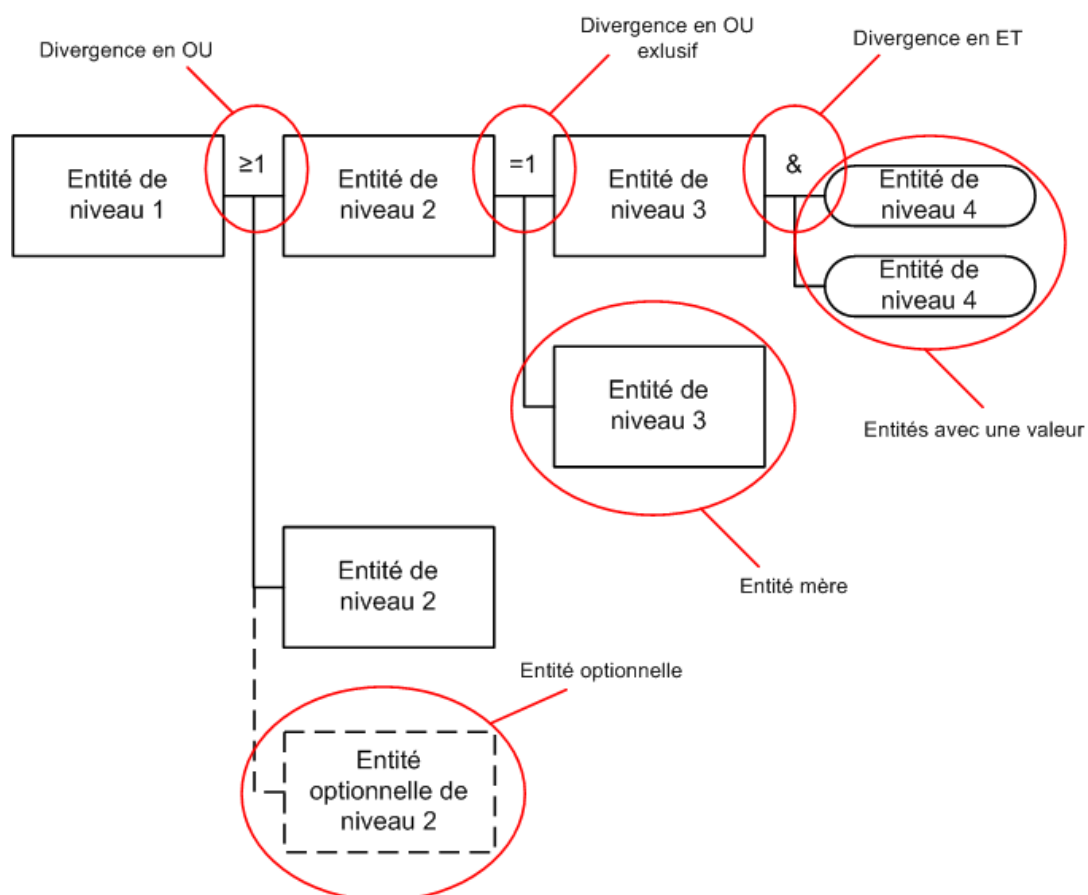


Figure 39 : Organisation du modèle hiérarchisé des données

3.3 Première partie : description de l'espace de travail

Cette première partie est divisée en trois niveaux : la description du *projet de fabrication additive*, la *description de la pièce* et la *description de la machine*.

3.3.1 Niveau 1 : description du projet de fabrication additive

Le premier niveau du modèle hiérarchisé (Figure 40) est la définition du contour général du *projet de fabrication additive*. Ce niveau est commun à tous les projets de fabrication (additive ou d'usinage) et est nécessaire. On retrouve dans ce niveau toutes les informations générales sur la dénomination du projet, les personnes travaillant sur le projet, les données de gestion de projet...

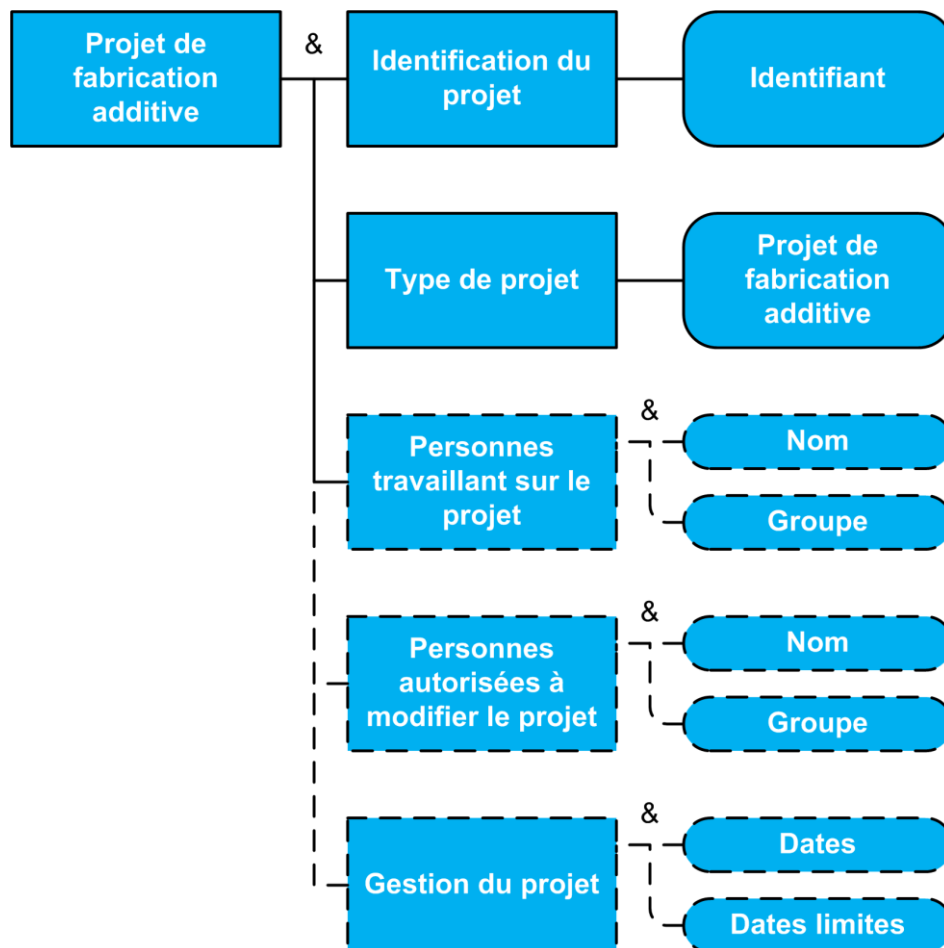


Figure 40 : Description d'un projet de fabrication additive

3.3.2 Niveau 2 : description de la pièce

Lorsque le projet est défini, le niveau suivant est la définition de la *description de la pièce*. En effet, ce niveau doit intervenir le plus tôt possible dans le modèle hiérarchisé, car la machine utilisée et les paramètres de fabrication dépendent de la pièce à réaliser. Mais ce niveau ne peut être défini qu'après avoir défini les contours du projet de fabrication additive.

Comme montré précédemment, le modèle actuel de description des pièces pour la fabrication par ajout de matière était satisfaisant lorsque ces procédés n'étaient utilisés que pour la réalisation de prototypes. Il est aujourd'hui trop limité avec de nombreux manques et défauts pour être le modèle de procédés matures (voir chapitres précédents).

Nous proposons donc ici un nouveau modèle de description des pièces réalisées par ajout de matière (Figure 41 et Figure 42) basé sur une *description géométrique* et une *description non-géométrique*. Ce modèle répond aux nouvelles problématiques posées par l'évolution des procédés de fabrication additive, ses points forts sont les suivants :

- Ce nouveau modèle est basé sur une description par entités de fabrication. Il pourra s'appuyer sur une base de données entités existantes, à laquelle de nouvelles entités de fabrication dédiées fabrication additive pourront être ajoutées.
- C'est un modèle exact sans perte de données sur les surfaces ou la géométrie de la pièce.
- Cette nouvelle description permet de régler les paramètres de fabrication pour chaque entité en accord avec le cahier des charges.
- Chaque entité a sa propre direction de fabrication, ce qui facilite la fabrication multi-axes.
- Ce nouveau modèle de description permet d'avoir un modèle de pièces avec des entités réalisées en usinage et d'autres en fabrication additive, ce qui facilite la description de pièces multi-procédés [BON09] [LAG09c] [RAU09b] [BON10].
- Ce nouveau modèle permet de garder des informations sur les propriétés mécaniques de la pièce (Figure 42).
- Aucune opération de post-processing n'est nécessaire, car ce modèle est interopérable sur toutes les machines et les systèmes de CFAO.
- Des supports préformés [KER09a] [KER10] peuvent facilement être déclarés, il suffit de déclarer que les entités de fabrication concernées sont des supports.
- La définition d'une pièce fabriquée en multi-matériaux (par exemple FGM) peut être déclarée dans les paramètres relatifs aux matériaux (Figure 41).

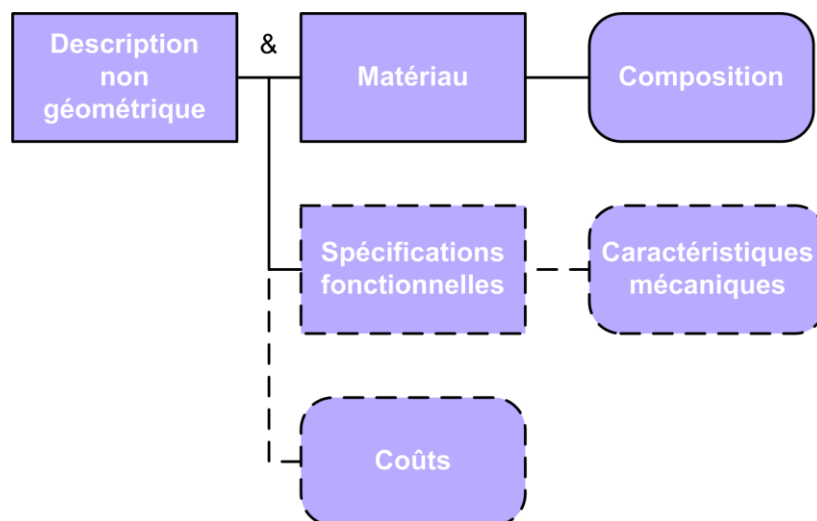


Figure 41 : Description non-géométrique d'une pièce de fabrication additive

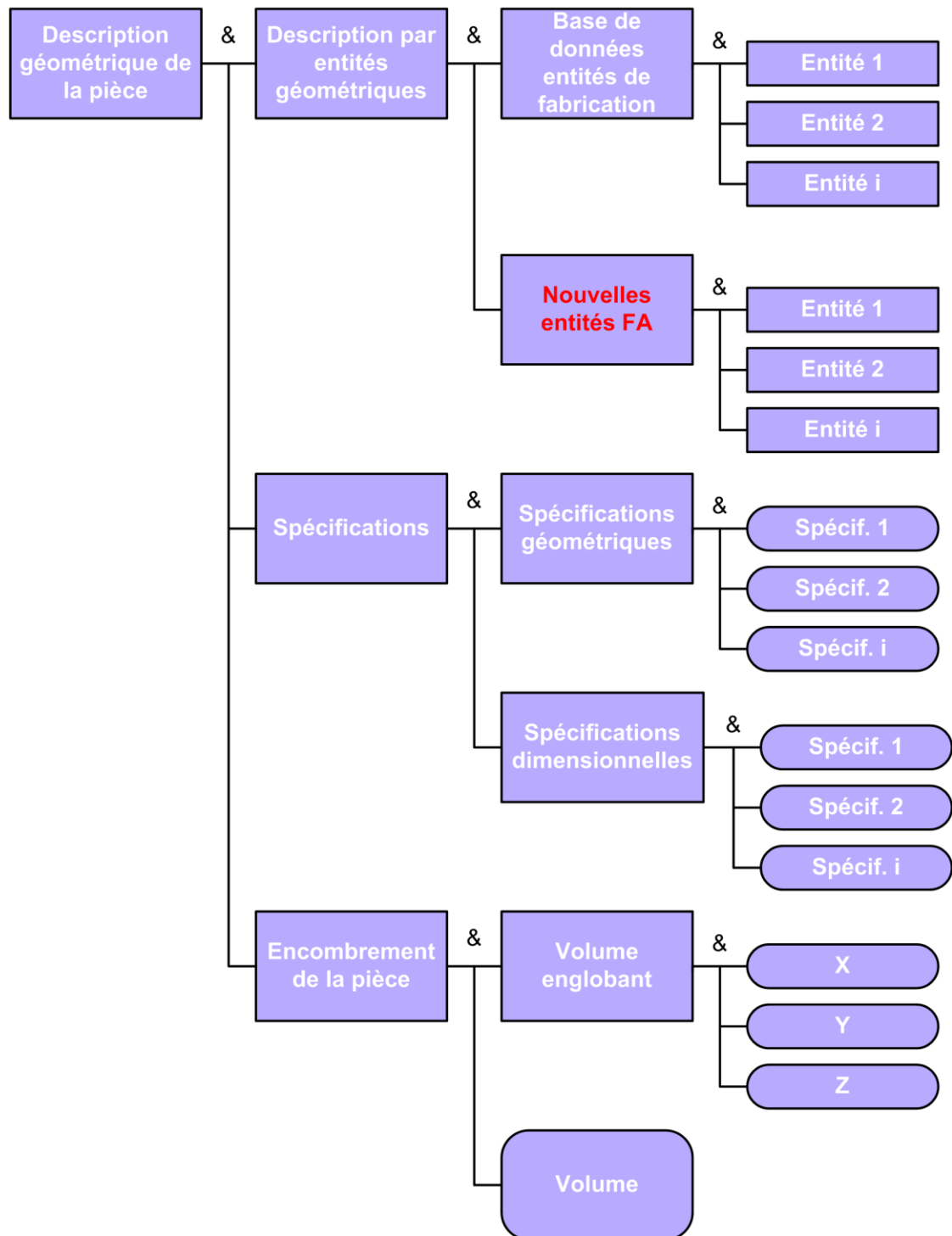


Figure 42 : Description géométrique d'une pièce de fabrication additive

3.3.3 Niveau 3 : description de la machine

Le choix de la machine de fabrication par ajout de matière dépend du type de projet de fabrication additive et des caractéristiques de la pièce à fabriquer. C'est pourquoi ces informations ne peuvent être définies qu'après avoir renseigné les informations présentées dans les deux premiers niveaux de notre modèle complet. De plus, ce niveau doit intervenir avant le choix des paramètres de fabrication car la machine peut les influencer.

Le nouveau modèle de description des machines de fabrication additive se veut être un modèle générique et évolutif. En effet, celui-ci doit permettre de décrire toutes les machines de fabrication additive existantes, mais doit aussi pouvoir incorporer de nouvelles machines si des évolutions apparaissent dans le futur au niveau des procédés de fabrication par ajout de matière.

Pour être valide ce nouveau modèle doit aussi s'accompagner d'évolutions au niveau du matériel numérique utilisé. Des changements interviennent notamment au niveau des DCN et logiciels assistés par ordinateurs qui deviennent génériques et non plus propriétaires.

La première information dans le nouveau modèle de description des machines de fabrication additive est la définition des technologies de fabrication. Ce modèle s'inspire de l'étude bibliographique faite au chapitre 2 sur les différentes structurations pour l'organisation des technologies de fabrication par ajout de matière [CAM94] [PAU96] [YAN96] [CHU98] [PHA98] [HON03] [LEV03] [DIN04] [KRU05] [RUA06] [SAN06]. La description de la *technologie de la machine* (Figure 43) se décompose en deux parties. La première partie qui décrit le type de transformation de matière effectué par la machine (qui dépend du type de machine : transformation poudre → solide, liquide → solide ou solide → solide) ainsi que les différents détails technologiques associés à ces types de transformation de matière. La deuxième partie est la description des outils associés à la machine qui se décompose en deux sous parties : les outils qui transforment la matière (laser, EBM...) et les outils qui amènent la matière (racleur, buse de projection de poudre...). Le type de technologie de fabrication additive choisie dépend bien entendu des deux niveaux précédents du modèle à savoir : la description du projet et la description de la pièce.

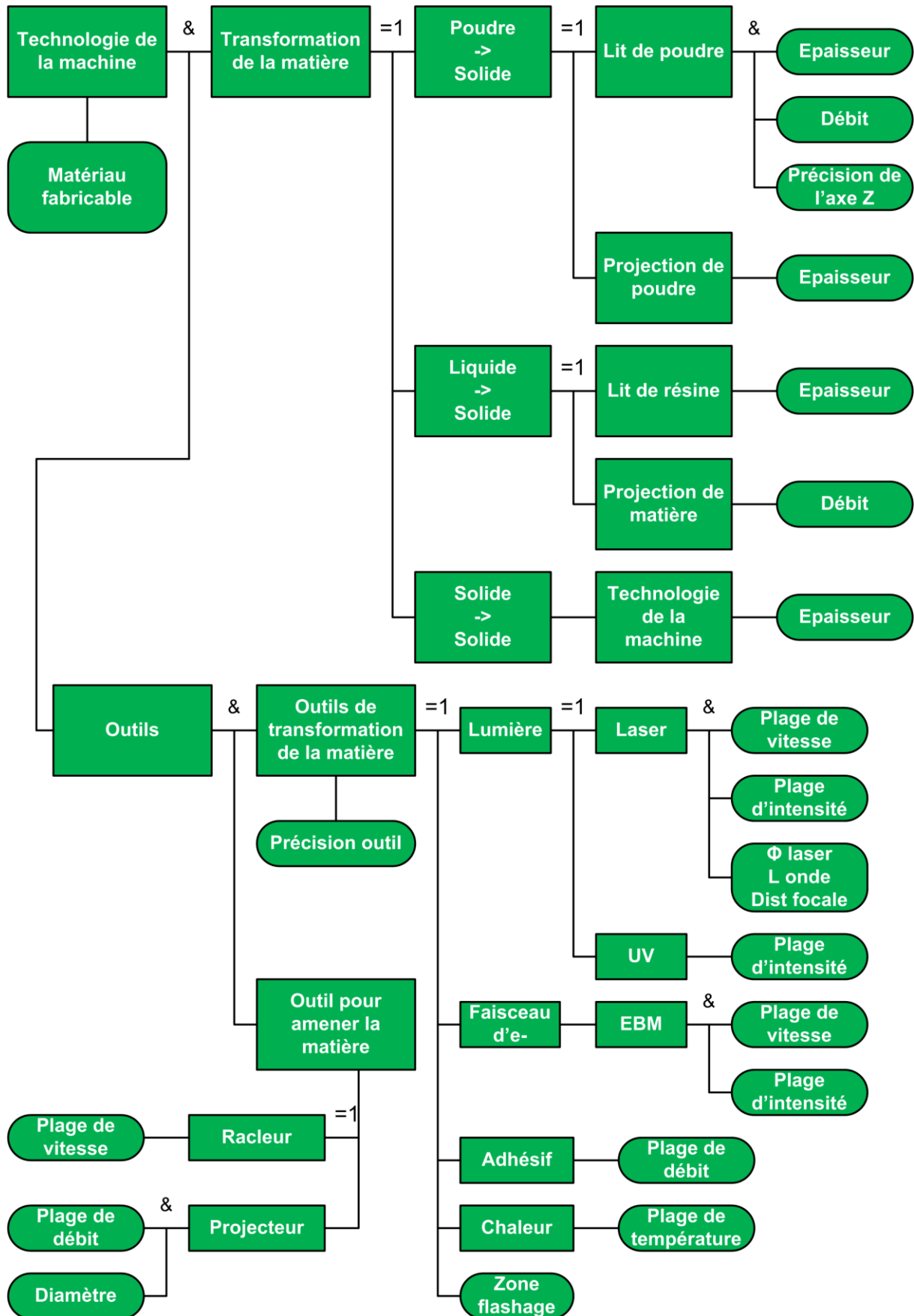


Figure 43 : Description des technologies de fabrication additive

Pour une bonne gestion et connaissance des procédés de fabrication additive, il est important de définir en détail la machine de fabrication utilisée. C'est pourquoi toutes les informations concernant l'espace de fabrication de la machine, ainsi que ses performances dynamiques doivent être définies.

Les premières informations concernent la *description géométrique de la machine* (Figure 44), avec la définition de l'espace de travail (définition des axes utilisés avec leurs courses), une cartographie des capacités de fabrication de la machine et un modèle CAO de la machine. Ces données sont importantes à définir dans l'optique de l'intégration de notre modèle dans un environnement numérique complet. En effet, elles doivent être renseignées dans le cas de l'utilisation de logiciels CFAO génériques pour la préparation de la fabrication.

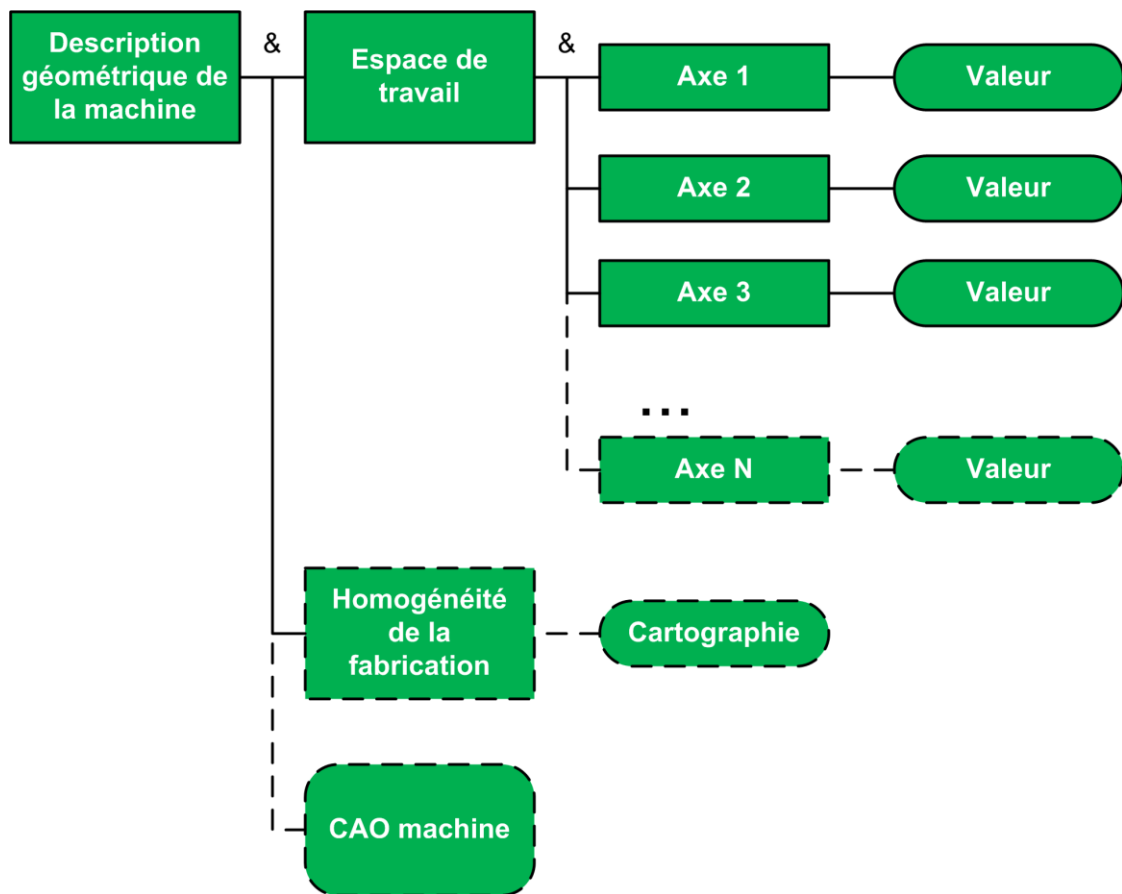


Figure 44 : Description de la géométrie de la machine de fabrication additive

De la même manière les informations sur la *cinématique et la dynamique de la machine* de fabrication additive (Figure 45) sont indispensables pour la définition d'un modèle FAO d'un projet de fabrication additive. Ces données sont aussi importantes à définir pour pouvoir déterminer des valeurs limites à ne pas dépasser lors du réglage des paramètres de fabrication par ajout de matière.

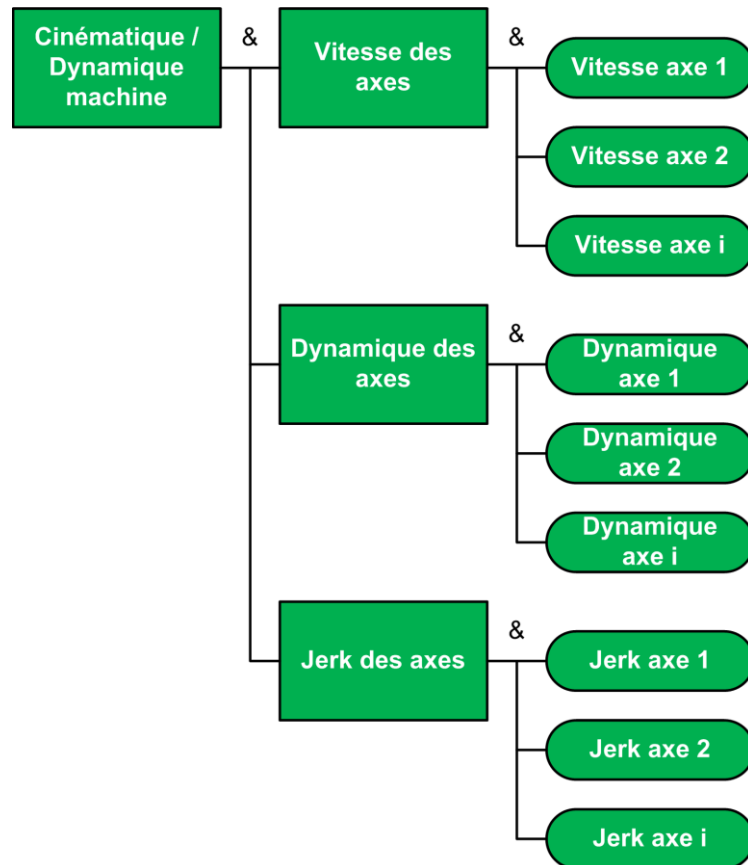


Figure 45 : Description de la cinématique/dynamique de la machine de fabrication additive

Toutes les informations qui concernent le niveau 3 du modèle hiérarchisé sont introduites dans un modèle numérique générique. Comme nous l'avons évoqué nos propositions au niveau de la gestion des données numériques doivent s'accompagner de changements profonds au niveau des solutions numériques proposées actuellement en fabrication additive.

Le niveau de *description de la machine* précède le niveau de *préparation de la fabrication*. Ce niveau 4 ne peut pas intervenir plus en amont dans le modèle car les informations des niveaux 1, 2 et 3 doivent nécessairement être renseignés pour régler les paramètres inhérents à la fabrication. Le niveau de *préparation de la fabrication* est très important car ce sont les paramètres réglés à ce niveau qui déterminent la qualité et l'aspect de la pièce finale. Les choix réalisés pour obtenir le modèle de ce niveau sont expliqués dans le paragraphe suivant.

3.4 Deuxième partie : Réglage des paramètres et Programme

3.4.1 Niveau 4 : description de la préparation de la fabrication

La plupart des problèmes actuels liés à la chaîne numérique pour les procédés de fabrication par ajout de matière sont présents au niveau 4 du modèle hiérarchisé : *préparation de la fabrication*. En effet, plusieurs problèmes évoqués auparavant, liés à l'utilisation du format de données numériques actuel, ne permettent pas un réglage optimal

de la fabrication. Nous proposons donc un modèle de préparation de la fabrication qui fait des propositions pour pallier ces défauts. Tout d'abord en intégrant toutes les informations de préparation de la fabrication : modèle numérique, outils, paramètres de la chambre de fabrication et paramètres de fabrication en général, dans un modèle générique pour toutes les machines et technologies de fabrication additive.

Le *modèle produit pour la fabrication additive* (Figure 46) est l'un des points les plus importants du nouveau modèle de données que nous proposons. C'est, en effet, à partir de la définition de ce modèle que les paramètres inhérents à la fabrication vont être réglés. La définition de ce modèle conditionne donc la qualité de la pièce fabriquée. De plus, celui-ci propose une alternative aux défauts liés à l'utilisation du standard STL, utilisé actuellement en fabrication additive, à savoir :

- Intégrer un système avec un modèle numérique générique pour toutes les préparations de la fabrication.
- Permettre une optimisation du modèle produit pour la fabrication additive.
- Permettre d'avoir un tranchage et une direction de fabrication qui ne soient pas unique pour toute la pièce à réaliser.

Pour s'affranchir des défauts induits par l'emploi du format STL et répondre aux enjeux d'une meilleure préparation de la fabrication en fabrication additive, nous proposons de nous appuyer sur un nouveau modèle produit basé sur des entités de fabrication.

Les premiers travaux qui évoquent l'approche par entités sont probablement ceux de Krypianou **[KRY80]**, en 1980. Le concept d'entités de fabrication apparaît lui un peu plus tard, en 1982, avec les travaux de Arbab qui mettent en avant la similitude entre les opérations booléennes utilisées pour représenter un modèle numérique en CSG (*Constructive Solide Geometry* : représentation d'objets solides par combinaison d'objets solides simples) et l'usinage par enlèvement de matière qui consiste à retirer des entités simples à une pièce brute **[ARB82]**. Ensuite, depuis les années 1990, ce concept d'entité (features en anglais) a fait l'objet de nombreux travaux, qui l'adopte comme représentation pour faciliter la conversion de données de conception en opérations de fabrication. Le groupe GAMA (Gamme automatique) a défini le concept d' « entités d'usinage » de la façon suivante **[GAM90]** : « Une entité d'usinage est une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquels un processus d'usinage est connu ». Ce concept a notamment été utilisé dans un objectif de génération de gammes automatiques d'usinage **[VIL03]**. Cette définition combine à la fois les informations géométriques et les données techniques du procédé de fabrication. Cette alliance de données, provenant conjointement de la géométrie et du procédé de réalisation, est la base de toutes les utilisations des approches par entités.

Nous proposons donc d'étendre le principe d'entités de fabrication à la fabrication par ajout de matière. Une description par entités de fabrication présente plusieurs intérêts. Tout d'abord, une telle description permet d'avoir un modèle exact avec toutes les informations sur la structure de la pièce, les surfaces et le volume au niveau de chaque entité. Ensuite, le modèle de description de la pièce par entités proposé au niveau du modèle produit permet désormais d'avoir un tranchage et une direction de fabrication pour chaque entité. On peut donc appliquer sur chaque entité des critères d'optimisation de l'orientation et du tranchage qui sont liés à des critères tels que le cahier des charges, les spécifications, les caractéristiques mécaniques (RdM, MMC...), le temps de fabrication, le nombre de supports.

Plusieurs travaux dans la littérature se sont intéressés à ces problématiques de choix de direction de fabrication optimisée [LAN97] [ALE98] [HU02] [HAI03] [MAS03] [THR04] [KIM05] [AHN07] [PAN07]. Une fois l'orientation et le type de tranchage pour chaque entité définis, le modèle produit pour la fabrication additive est obtenu.

A partir de ce modèle produit pour la fabrication additive les autres paramètres de préparation de la fabrication (paramètres outils, paramètres de la chambre de fabrication, trajectoires, structure de la pièce, stratégies...) peuvent être réglés.

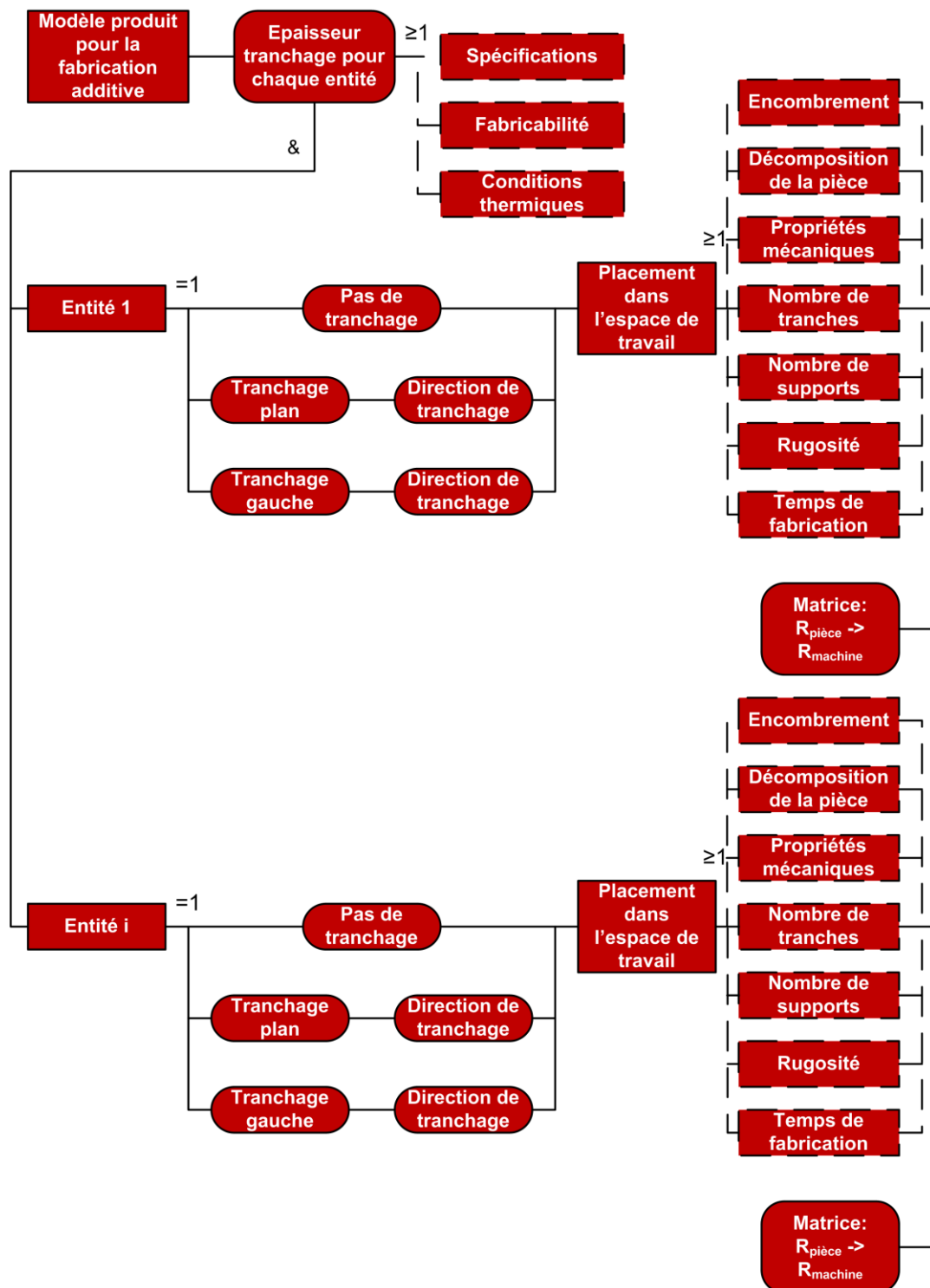


Figure 46 : Description du modèle produit pour la fabrication additive

Les réglages des paramètres des sources d'énergie (Figure 47) et de l'environnement de la machine (Figure 48) sont effectués pour chaque outil utilisé et pour chaque entité de fabrication. Ce nouveau modèle offre la possibilité d'avoir des changements de sources d'énergie. Cela permet d'avoir des sources d'énergie (lasers par exemple) de puissances différentes mieux adaptées aux formes à fabriquer : des lasers de plus faibles puissances et diamètres pour les détails et des lasers de plus grandes puissances et diamètres pour les motifs massifs.

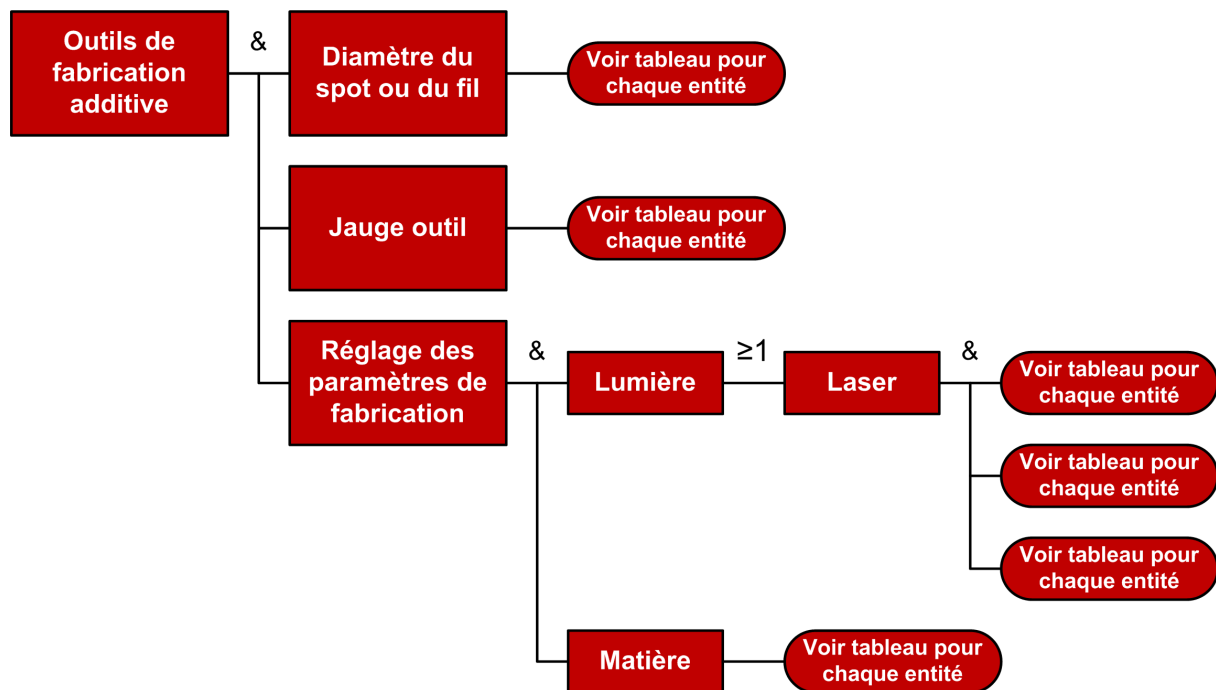


Figure 47 : Description des paramètres outils pour la fabrication additive

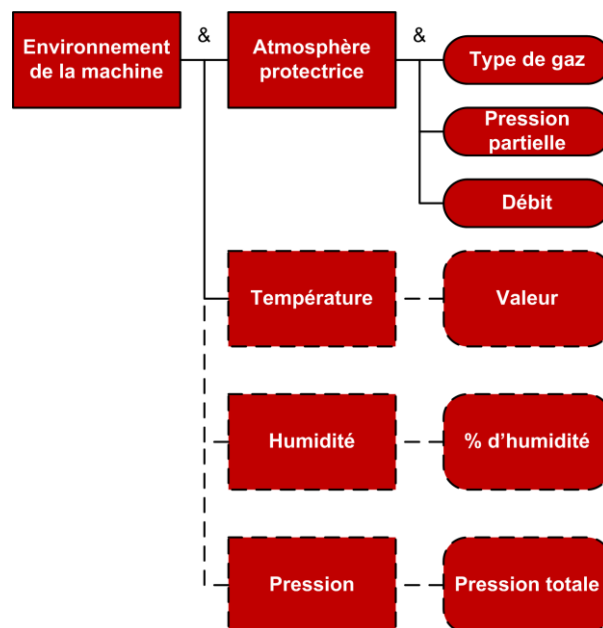


Figure 48 : Description des paramètres de la chambre de fabrication pour la fabrication additive

Après avoir réglé les paramètres de fabrication des sources d'énergie et de la chambre de la machine, le choix des paramètres de définition des stratégies et trajectoires peut être fait (Figure 49). Avec le modèle que nous proposons, il est possible de régler une stratégie différente pour chaque entité de fabrication. On retrouve des stratégies classiques de fabrication (planes ou gauches), comme celles développées en usinage. De nouvelles stratégies développées pour les procédés de fabrication additive (notamment en projection de poudre) pourront enrichir ce modèle. En plus, des stratégies de fabrication, les stratégies d'approche et retrait ainsi que les paramètres transitoires, de début et fin de fabrication sont à renseigner dans notre modèle.

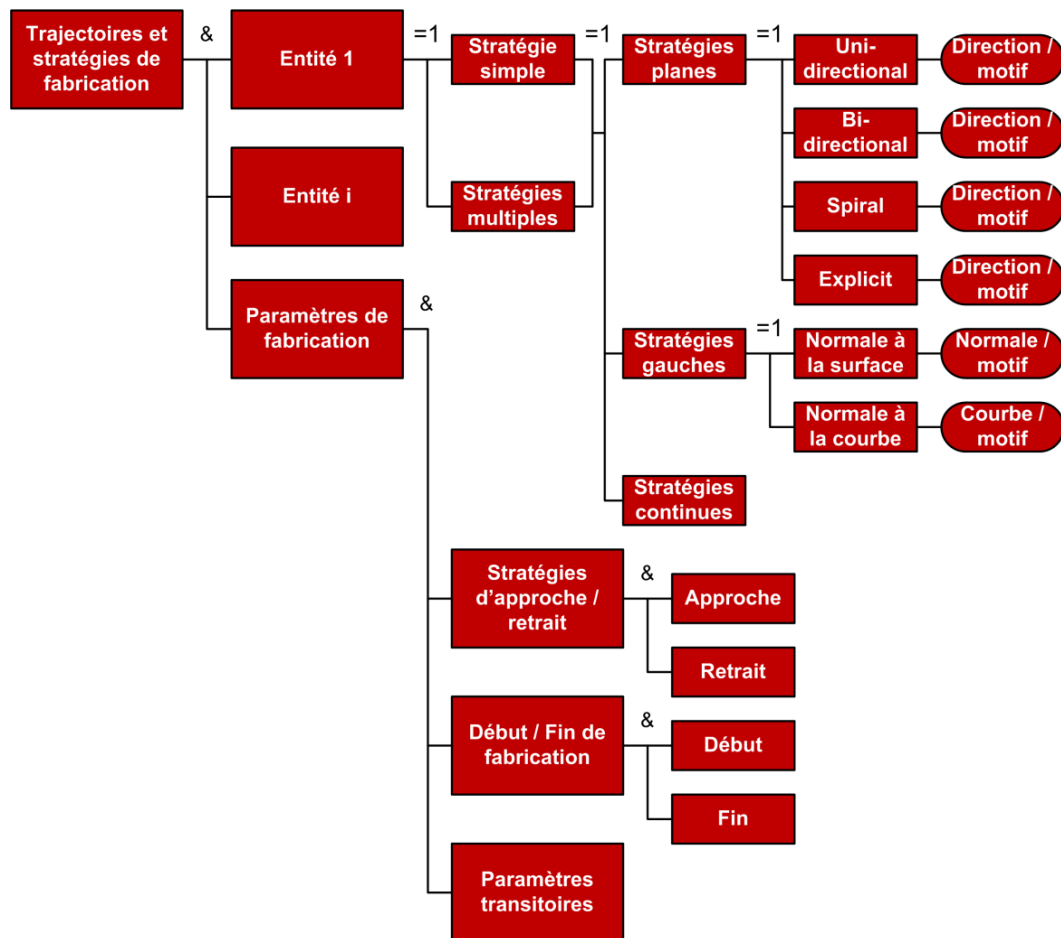


Figure 49 : Stratégies et trajectoires en fabrication additive

Les derniers paramètres à régler au niveau de la fabrication sont les paramètres liés à la structure de la pièce (Figure 50). Avec le format STL utilisé actuellement plusieurs défauts subsistent au niveau de ce choix.

Avec l'utilisation du format STL, le réglage de la structure de la pièce est une étape non générique (comme montré au chapitre 1 : génération de plusieurs fichiers pour les supports, la peau et la structure de la pièce...), qui diffère suivant le type de machine utilisée. Nous proposons donc un modèle de description de la structure de la pièce à fabriquer qui soit générique pour toutes les machines et technologies de fabrication additive. Ces

changements comme déjà évoqué précédemment s'accompagnent par des évolutions au niveau du l'environnement numérique de la machine.

Le modèle proposé ici permet de définir deux types de supports : des supports préformés (usinés, mécano-soudés, formés...) ou des supports internes/externes (Figure 51). Ce modèle permet également de définir des motifs sur la pièce définis pour chaque entité et d'avoir de la fabrication multi-matériaux (FGM...).

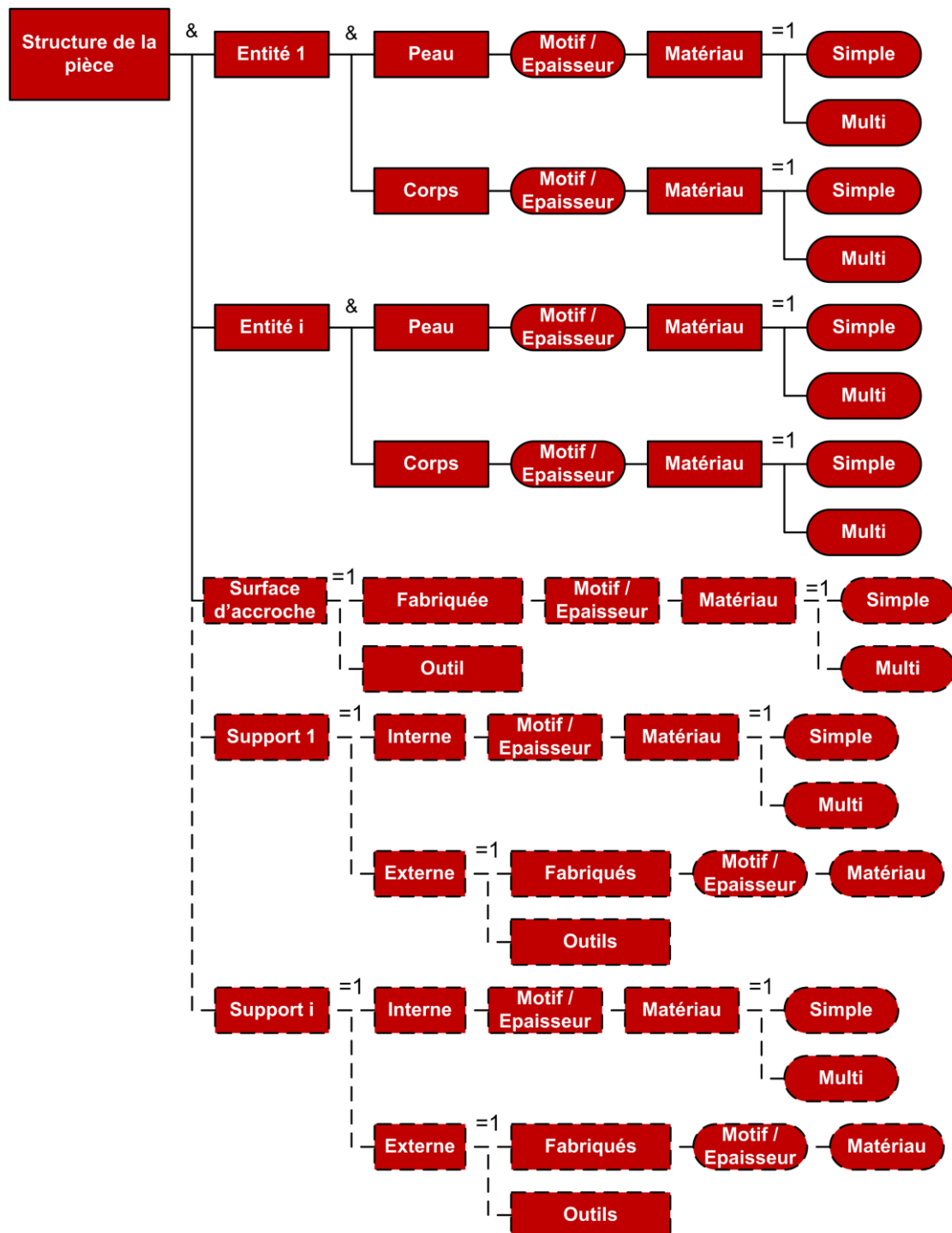


Figure 50 : Structure d'une pièce en fabrication additive

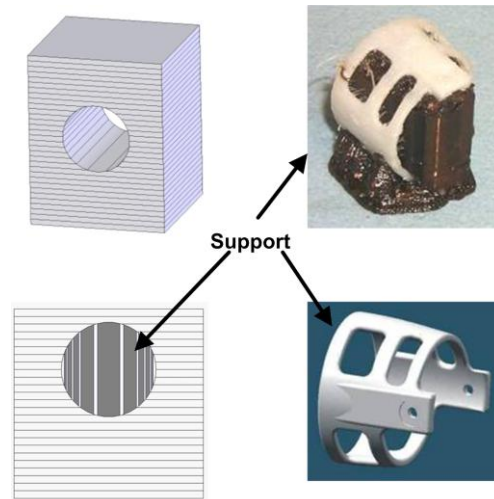


Figure 51 : Besoin de supports en fabrication additive

3.4.2 Niveau 5 : description du programme

Lorsque la définition de la fabrication est terminée, le programme pour le DCN peut être généré (Figure 52). Avec la situation actuelle en fabrication additive, de nombreux inconvénients sont liés à la génération du programme pour le DCN :

- Plusieurs fichiers doivent être générés pour la réalisation d'une même pièce.
- Le programme n'est valable que pour un seul type de machine, la portabilité n'est donc pas assurée.
- Seules des informations de bas niveau conceptuel sont présentes au niveau du DCN.
- Il n'y a pas d'échange de données possible entre le DCN et le modèle FAO.

Avec le modèle proposé ici, le programme généré est universel et peut être implémenté sur toutes les machines de fabrication additive (portabilité du programme est assurée). De plus, des données de haut niveau conceptuel sont disponibles au niveau du DCN (donc il y a plus d'intelligence au niveau du DCN) et donc l'échange de données est possible entre le DCN et la FAO.

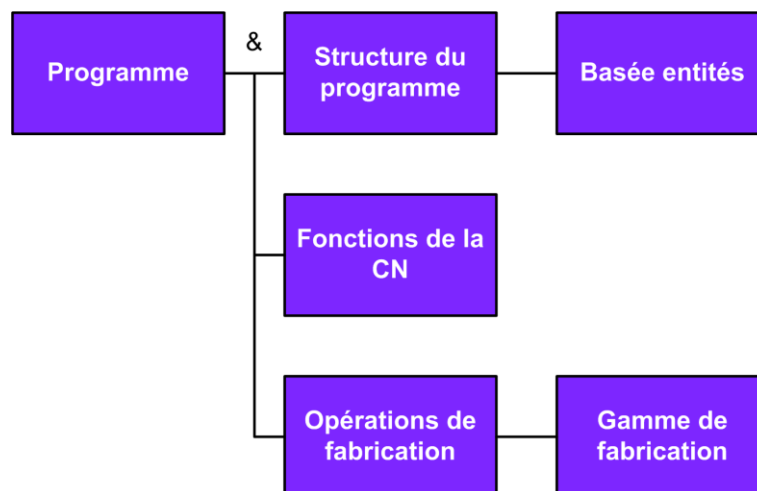


Figure 52 : Programme en fabrication additive

3.5 Troisième partie : Fabrication et Post-production

3.5.1 Niveau 6 : description de la fabrication

Le nouveau modèle que nous proposons ouvre aussi la possibilité de mise en place de modules de simulation et/ou d'optimisation de la fabrication au niveau du directeur de commande numérique (Figure 53). Ces modules ne sont pas encore développés pour la fabrication additive, mais notre modèle qui permet de capitaliser des informations sur le process de fabrication additive, laisse la possibilité de réaliser du contrôle de la fabrication en cours de process et de faire des corrections en cours de process. Ce genre de modules ont déjà été développés par notre équipe de recherche au niveau de l'usinage, avec de nombreux travaux encadrés par J.-Y. Hascoët [DUG03] [TER04] [HAS06c] [RIT06] [LAG08] [RAU09b] [RAU09c]. Dans notre modèle pour la fabrication, nous proposons également la possibilité de mettre en place des modules pour une évaluation environnementale de la fabrication réalisée.

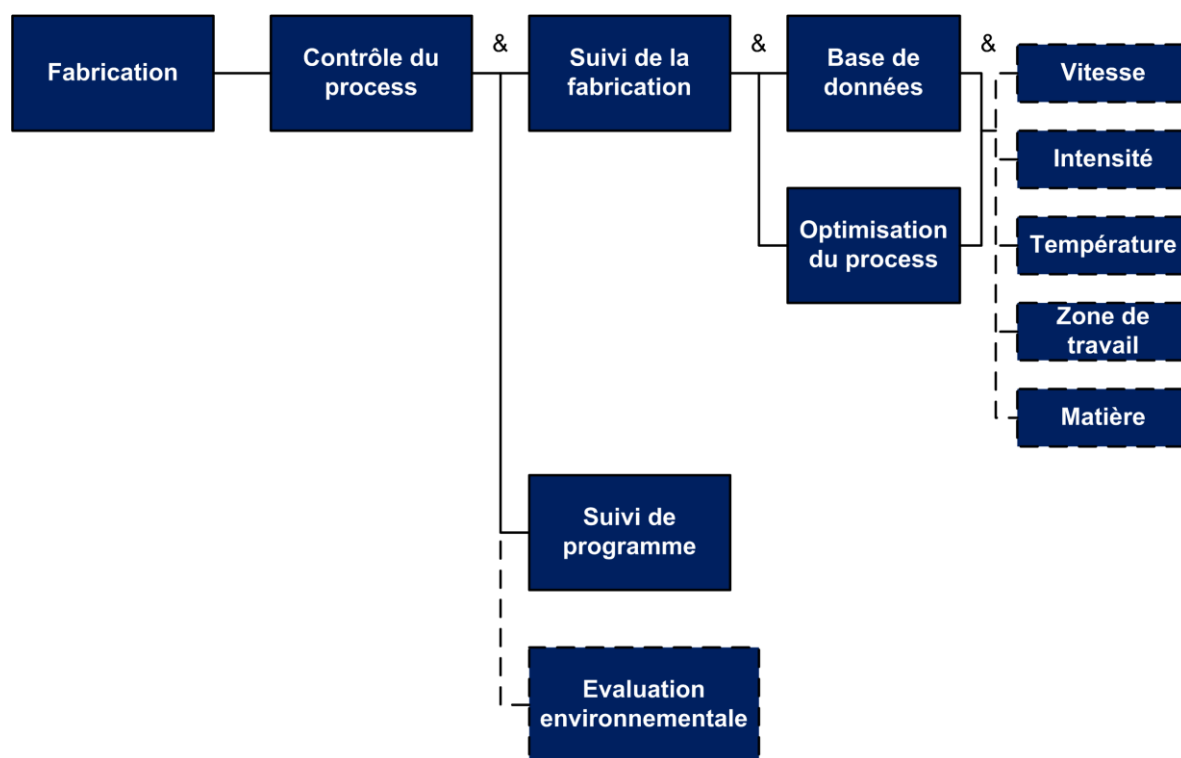


Figure 53 : Fabrication additive

3.5.2 Niveau 7 : description de la post-production

Lorsque la fabrication est terminée, le dernier niveau d'un projet de fabrication est la post-production. Ce dernier niveau se décompose en trois parties. Les deux premières concernent les opérations de finition (Figure 54) et les opérations de métrologie effectuées sur la pièce (Figure 55). Le nouveau modèle proposé ici est innovant, car il propose d'avoir un unique modèle de données pour la réalisation de la fabrication additive, les opérations de finition (usinage ou autres) et la métrologie. Cette démarche permet de ne pas multiplier les

modèles, ce qui permet de limiter les post-traitements et les conversions de données numériques.

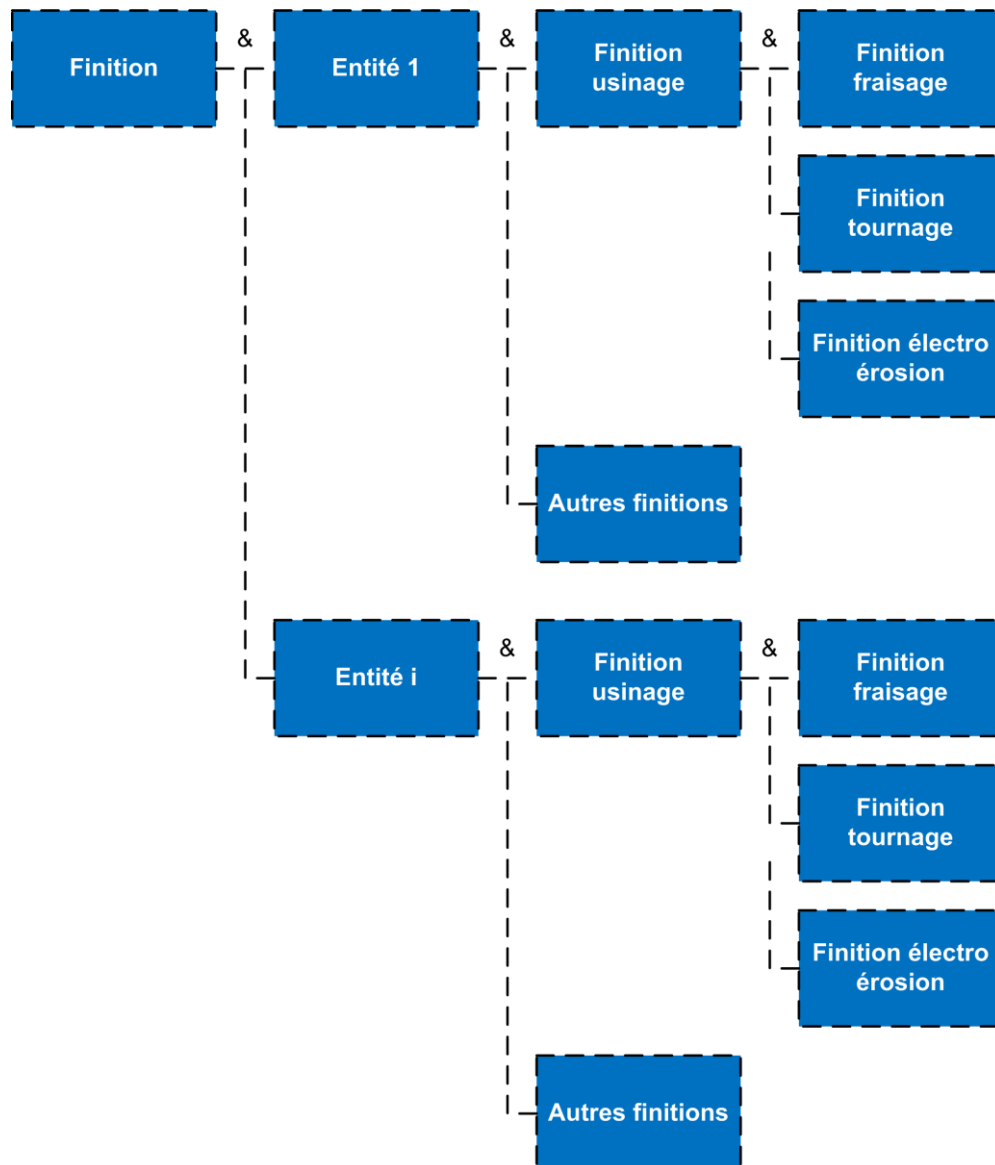


Figure 54 : Opérations de finition

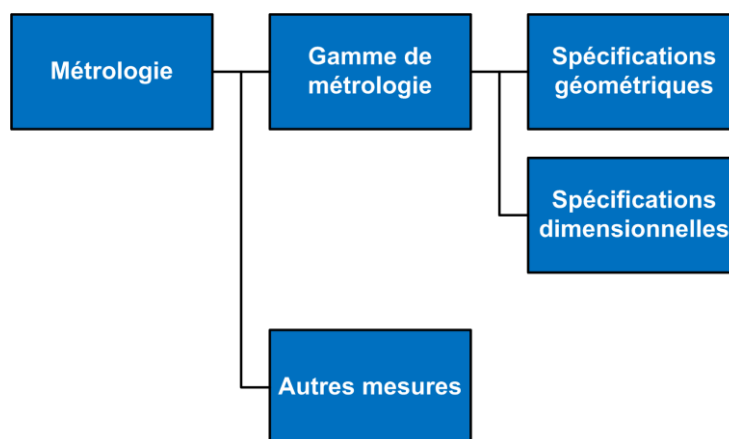


Figure 55 : Métrologie d'une pièce réalisée en fabrication additive

Les dernières informations de ce dernier niveau concernent le développement durable (Figure 56). Cette partie devient de plus en plus un enjeu majeur pour le développement des procédés de fabrication. En effet, le contexte actuel fait que l'on se dirige actuellement vers une recherche des procédés les moins polluants vis-à-vis de l'environnement. Ainsi, de plus en plus de travaux autour de ces thématiques pour évaluer ou réduire l'empreinte écologique de ces procédés, ont été réalisés, notamment par P. Mognol [MOG06] ou Hague [HAG09]. Ces problématiques seront l'un des enjeux majeur à l'avenir, il est donc important de les intégrer dès à présent dans notre nouveau modèle.

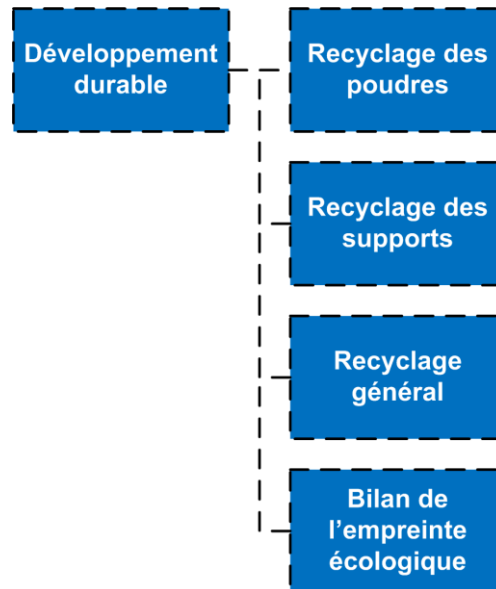


Figure 56 : Développement durable pour les procédés de fabrication additive

3.6 Synthèse sur le modèle complet et hiérarchisé des données

Le modèle de description des données des procédés de fabrication additive que nous avons proposé, est un modèle générique, complet et hiérarchisé. Il propose des solutions alternatives aux défauts inhérents à la description d'un projet de fabrication par ajout de matière, basé sur le format STL.

Par ailleurs, ce modèle des données numériques doit être accompagné s'il veut être mis en place de changements profonds au niveau des équipements et solutions numériques :

- Machines de fabrication additive doivent être équipées de DCN génériques.
- Des solutions de CFAO génériques adaptées à la fabrication additive doivent être développées.

L'un des points fort de ce modèle est qu'il est basé sur une description par entités, ce qui facilite son évolution et son enrichissement. A la suite de ce modèle, la prochaine étape de la méthodologie générale proposée dans ces travaux est désormais la proposition d'intégration de ce modèle dans un standard de haut niveau conceptuel basé entités.

A travers un exemple, nous allons montrer la viabilité de ce modèle pour la description d'un projet complet de fabrication additive. Cet exemple est présenté dans la partie suivante de ce chapitre.

4. Exemple de description du modèle hiérarchisé des données

4.1 Présentation du contexte de l'exemple

Cet exemple permet de montrer le fonctionnement du modèle hiérarchisé que nous avons proposé précédemment dans ce chapitre. Pour cet exemple, nous avons tout d'abord défini une pièce-test qui permette d'illustrer les nouveaux concepts mis en place par notre modèle. La machine qui est utilisée pour la réalisation de la pièce-test est une machine de projection de poudre 5 axes présente à l'IRCCyN. Dans la suite, nous allons présenter les trois niveaux de notre modèle hiérarchisé, et nous verrons quels sont les avantages de notre modèle par rapport au modèle existant.

4.2 Choix de la pièce-test

L'examen de diverses pièces-test développées pour des applications de fabrication par ajout de matière et d'autres procédés nous a poussés à décrire notre pièce-test comme un agencement de formes élémentaires se retrouvant habituellement en fabrication additive. C'est pourquoi nous avons conçu la pièce-test de la Figure 57, le dessin de définition est présenté sur la Figure 58.

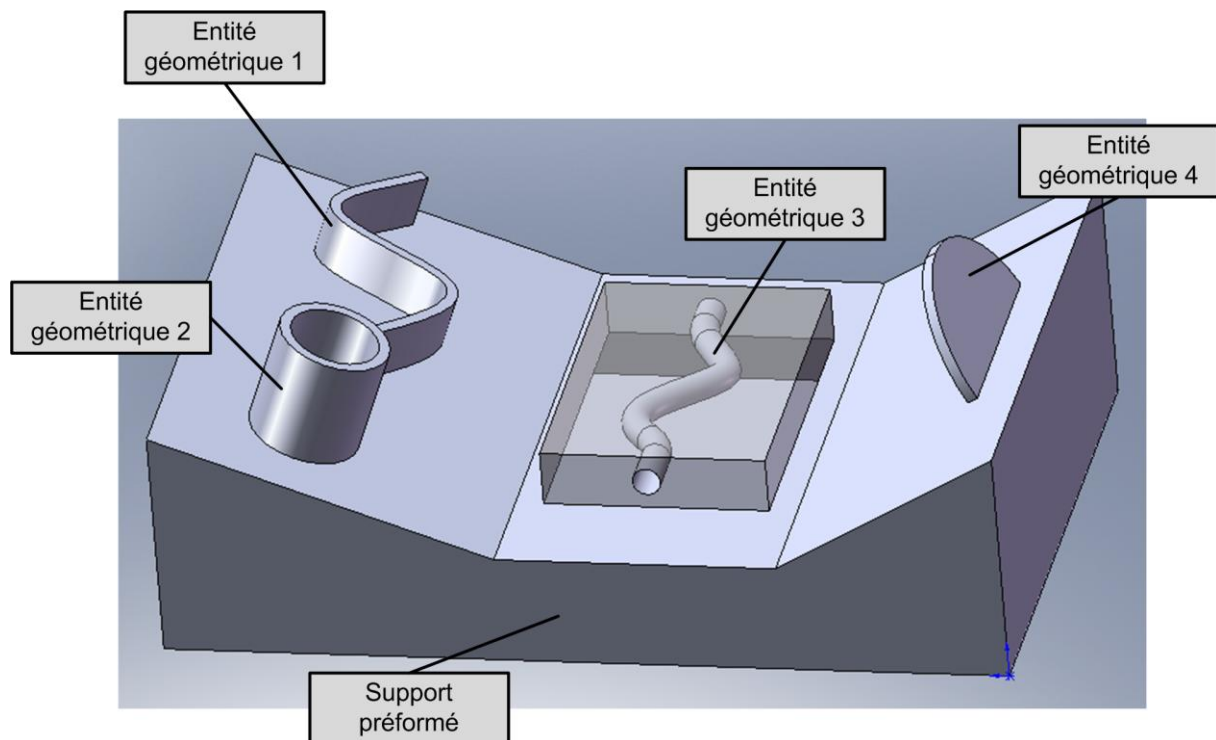


Figure 57 : Pièce-test et ses entités géométriques

Nous remarquons que cette pièce est bien composée d'un agencement d'entités élémentaires. On peut remarquer que l'entité géométrique 3 est composée d'un canal conforme qui est une forme typique des procédés de fabrication additive. Les entités géométriques 1, 2 et 4 sont des entités minces également typiques en projection de poudre.

On peut constater, pour ces dernières, des formes qui permettront des réalisations en 3 ou 5 axes (ce qui nous permettra de valider la définition de différentes stratégies pour chaque entité de fabrication). Enfin, notre pièce-test est composée d'un support préformé ce qui nous permet d'illustrer certains concepts du modèle hiérarchisé.

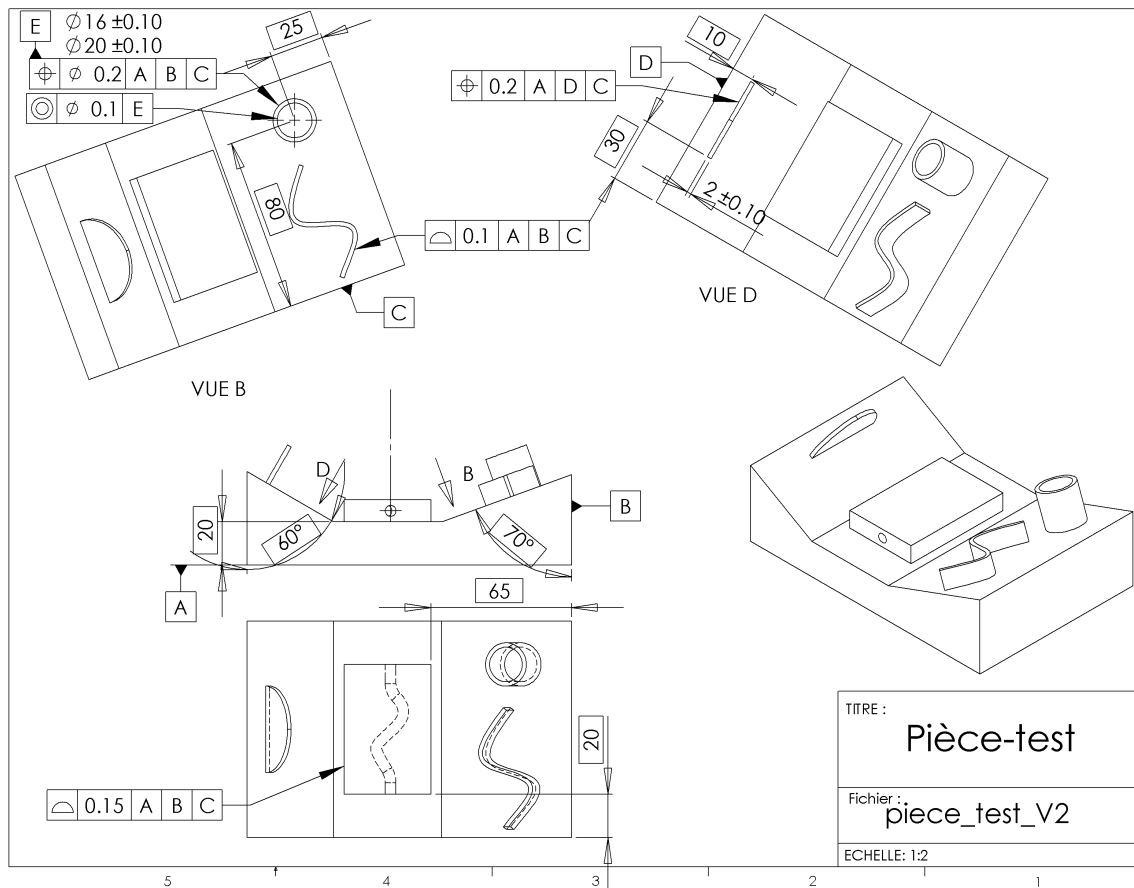


Figure 58 : Dessin de définition de la pièce-test

4.3 Première partie du modèle de l'exemple

Comme nous l'avons présenté précédemment, le premier niveau du modèle hiérarchisé des données est la définition du contour du projet en général. Dans le cas de notre exemple sur notre pièce-test, les informations à définir à l'étape 1 sont les suivantes :

- Identification du projet : pièce_test.
- C'est un projet de fabrication additive conduit par l'équipe MO2P de l'IRCCyN.
- Les personnes travaillant sur le projet sont les membres de l'équipe MO2P.
- Les personnes autorisées à modifier le projet sont les membres de l'équipe MO2P.
- Dates de début et fin du projet : 2007-2010.

On retrouve toutes ces informations structurées dans notre modèle sur la Figure 59, qui représente l'étape 1 de notre modèle hiérarchisé appliquée à notre pièce-test.

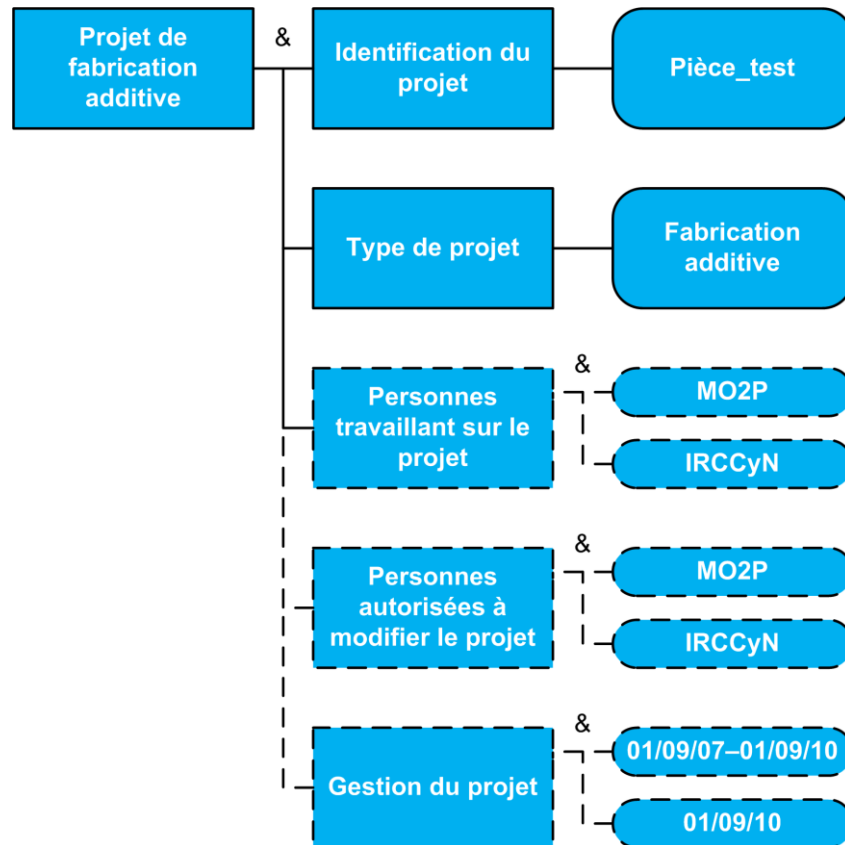


Figure 59 : Description du projet de fabrication additive de la pièce-test

Le deuxième niveau du modèle est la description de la pièce fabriquée. Cette étape est décomposée en deux parties : la description de la géométrie de la pièce d'une part et la description des paramètres non géométriques d'autre part. Les paramètres à renseigner sur la pièce-test que nous proposons sont les suivants :

- Description géométrique : voir Figure 57 pour la décomposition en entités géométriques.
- Volume de la pièce : 439 448,09 mm³, et boîte englobante 150 x 54,41 x 100 mm.
- Dimensions de la pièce-test : modèle CAO de la Figure 57.
- Matériaux de la pièce : entité préformée (acier), entité géométrique 1(acier + stellite), entité géométrique 2 (acier), entité géométrique 3 (acier), entité géométrique 4 (acier).
- Caractéristiques mécaniques : R>500MPa, Re>350MPa, A%>10%, HB>200 pour chaque entité de la pièce-test.

Le modèle que nous proposons permet de décrire notre pièce-test par entités. Toutes les informations sur la géométrie (volume, surface...) sont donc conservées. De plus, des informations non géométriques peuvent aussi être assignées à la pièce-test : spécifications, caractéristiques mécaniques, multi-matériaux (FGM)... Ce modèle est donc une avancée par rapport au modèle existant actuellement en fabrication additive.

On retrouve toutes ces informations structurées dans notre modèle sur les Figure 61 et Figure 60, qui représentent l'étape 2 de notre modèle hiérarchisé appliquée à notre pièce-test.

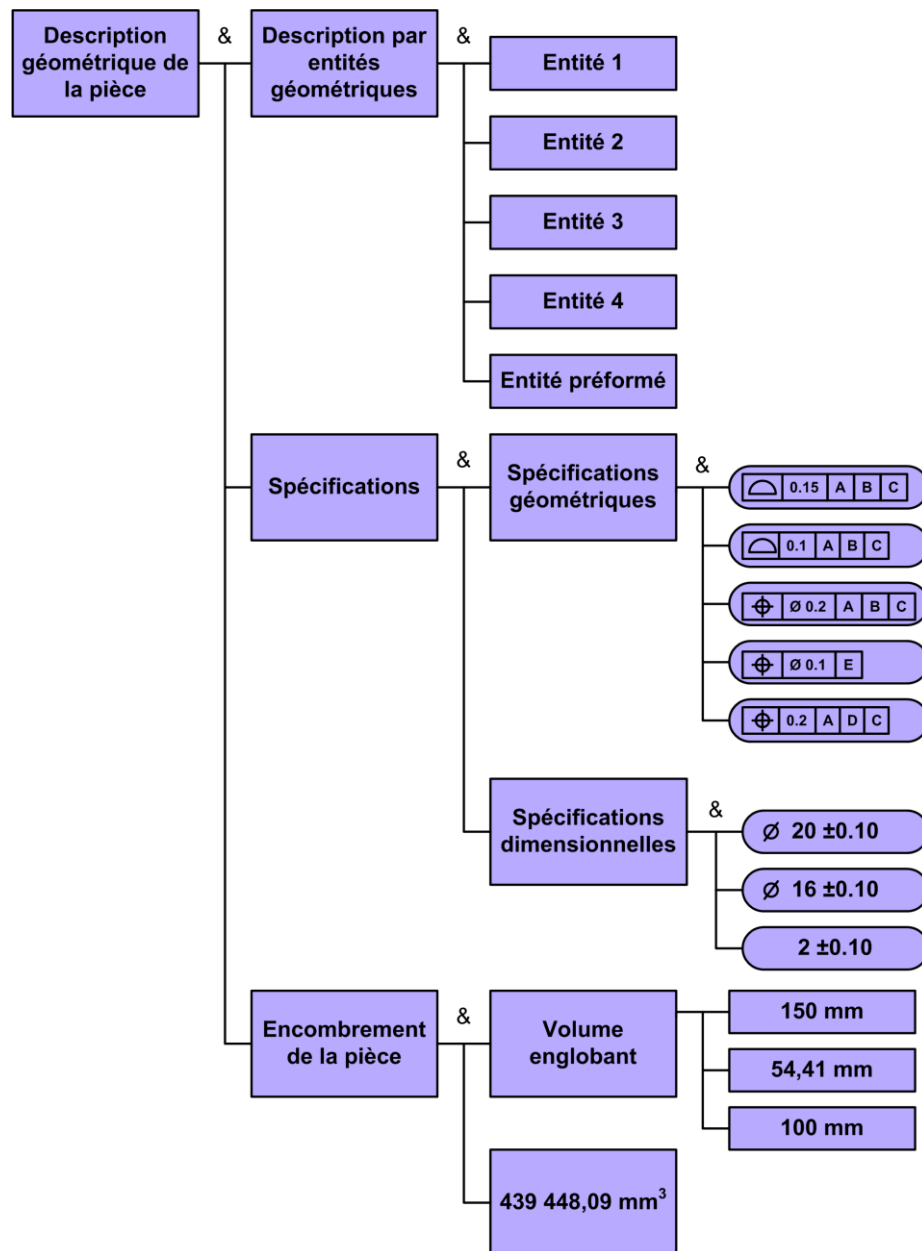


Figure 60 : Description géométrique de la pièce-test

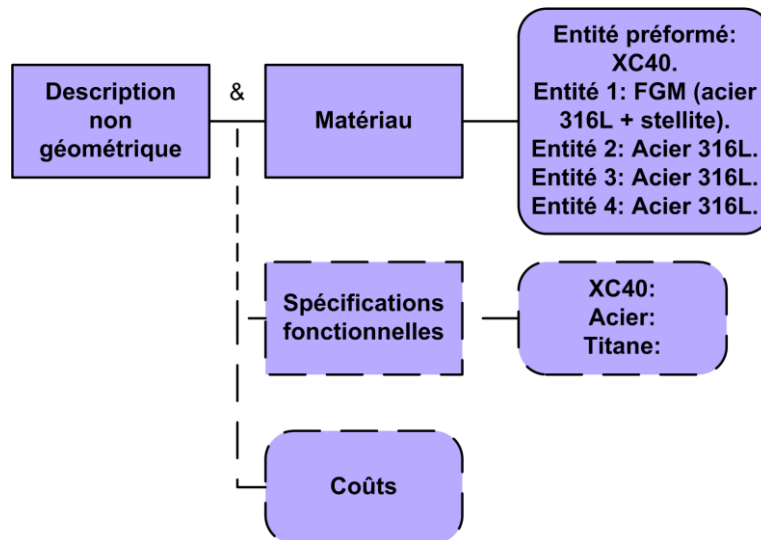


Figure 61 : Description non géométrique de la pièce-test

La machine de fabrication additive utilisée pour la réalisation de la pièce-test est une machine basée sur le principe de fabrication additive par projection de poudre. Cette machine CLAD (voir Figure 62), développée par IREPA laser, s'appuie sur un procédé de fusion de poudres. Sa structure est basée sur un centre d'usinage rapide Huron K2X 8 five et est équipée d'une commande numérique Siemens 840D. Elle est équipée également de deux buses de projection de poudre et d'un laser avec deux fibres optiques permettant de faire des cordons de différentes tailles.



Figure 62 : Machine CLAD de projection de poudre de l'IRCCyN

Le troisième niveau du modèle est la description de la machine de fabrication additive. Cette étape est décomposée en trois parties : la description de la technologie de la machine, la description géométrique de la machine et la cinématique/dynamique de la machine. Les paramètres à renseigner sur la machine sont les suivants :

- Transformation : Poudre → Solide.
- Système de projection de poudre : 2 buses pour de la projection de matière de largeur 3 mm et 1 mm.
- Laser :
 - Puissance : 4 kW.
 - 2 fibres optiques : $\Phi 200 \mu\text{m}$ et $\Phi 600 \mu\text{m}$.
 - Longueur d'onde : 1070-1080 nm.
- Machine 5 axes : axe X 650mm, axe Y 700mm, axe Z 400mm, axe A (-45°, 180°) et axe C 360°.
- Incertitude de mesure pour les axes X, Y et Z (4 μm) et pour A et C axis (7.2 s).
- Répétabilité sur les axes X, Y et Z axis (2 μm) et pour les axes A et C (3.6 s).
- Cinématique / Dynamique de la machine :
 - Vitesse maximum sur les axes X, Y et Z : 50 m/min.
 - Sur les axes A et C : 50 tr/min.
 - Accélération sur les axes X, Y et Z : 5 m/s².
 - Accélération sur les axes A et C : 18 rd/s².

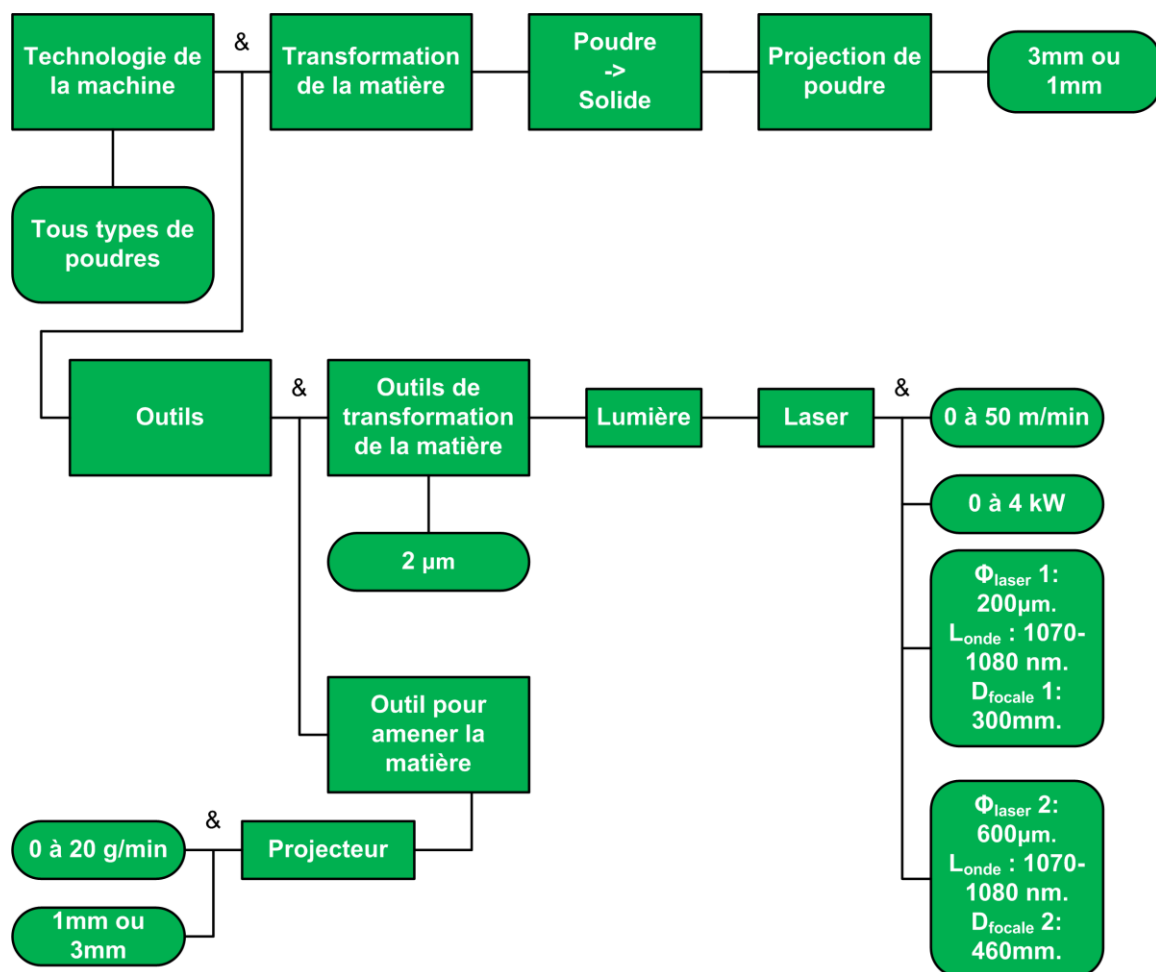


Figure 63 : Description de la technologie de fabrication additive de la machine CLAD

On retrouve toutes ces informations structurées dans notre modèle sur les Figure 63, Figure 64 et Figure 65, qui représentent l'étape 3 de notre modèle hiérarchisé appliquée à la machine de fusion de poudres métalliques.

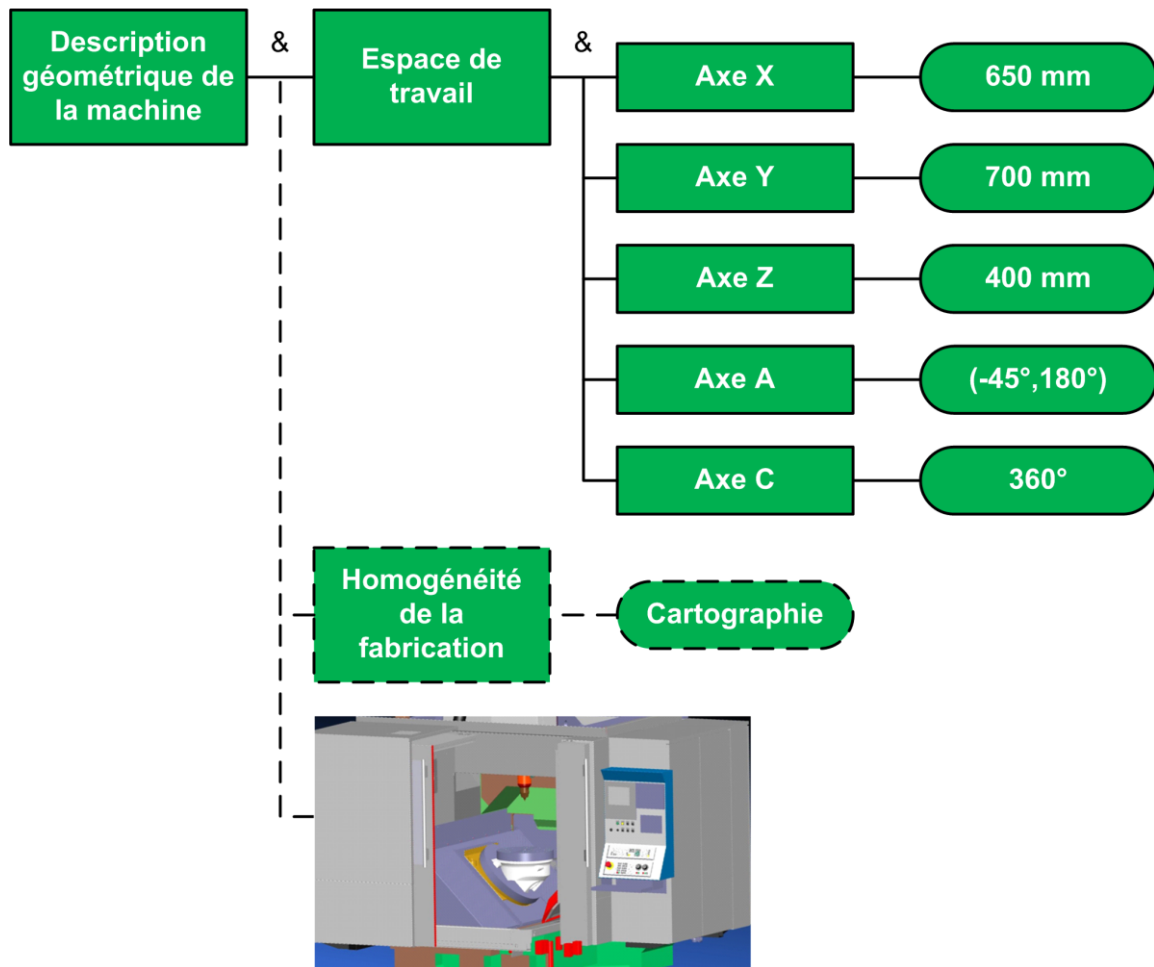


Figure 64 : Description de la géométrie de la machine CLAD

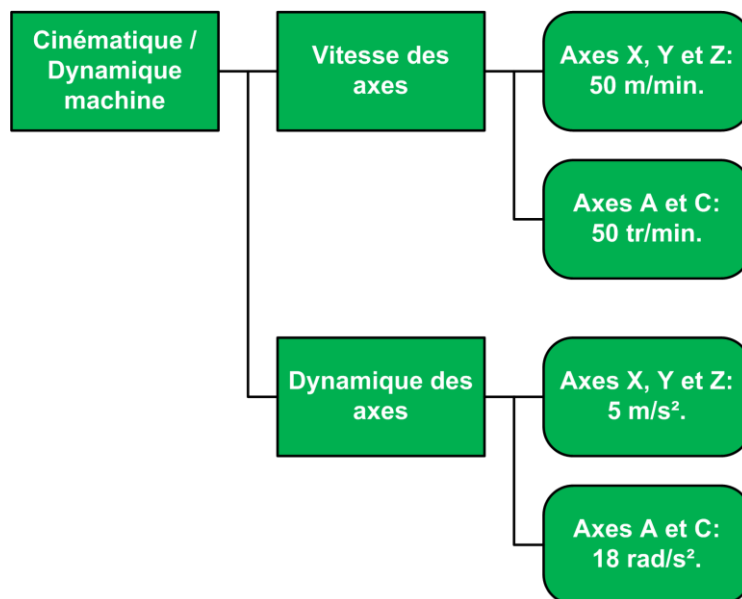


Figure 65 : Description de la cinématique de la machine CLAD

4.4 Deuxième partie du modèle de l'exemple

Le quatrième niveau du modèle hiérarchisé est le réglage des paramètres de fabrication additive. Ce niveau est décomposé en cinq parties : la description du modèle produit pour la fabrication additive, la description des outils de fabrication additive, la description de l'environnement de fabrication, la structure de la pièce et les stratégies et trajectoires de fabrication additive. Les paramètres à renseigner sur les paramètres de fabrication additive sont donnés dans le Tableau 4 suivant :

Entités	Tranchage	Orientation	Paramètres laser (vitesse, intensité)	Paramètres machine (débit matière, débit de gaz)	Stratégies	Structure de la pièce
Préformée	-	-	-	-	-	Surface d'accroche préformée (acier)
Entité 1	Plan avec une épaisseur de 0,2 mm	Normal à la préforme			Unidirectionnelle	FGM (acier 316L + Stellite)
Entité 2	Tranchage hélicoïdal	Normal à la préforme			Stratégie hélicoïdale	Acier (316L)
Entité 3	Tranchage gauche	Normal à la préforme			Stratégie 5 axes	Acier (316L)
Entité 4	Plan avec une épaisseur de 0,2 mm	Normal à la préforme			Bidirectionnelle	Acier (316L)

Tableau 4 : Renseignements des paramètres de fabrication de la pièce-test

L'apport du modèle que nous proposons dans cette thèse, est qu'il permet sur notre pièce-test de régler les paramètres de fabrication entité de fabrication par entité de fabrication. C'est un apport important par rapport au modèle actuel qui permet un tranchage unique sur toute la pièce et un réglage des paramètres de fabrication pour toute la pièce. Ce réglage permet de mieux coller aux exigences du cahier des charges et d'augmenter la qualité de la fabrication. De plus au niveau de la structure de la pièce, on peut avec notre modèle définir facilement des supports préformés ou des entités fabriquées en FGM, ce qui n'est pas le cas avec le format STL utilisé actuellement.

On retrouve toutes ces informations structurées dans notre modèle sur les figures suivantes : Figure 66, Figure 67, Figure 68, Figure 69 et Figure 70, qui représentent l'étape 4 de notre modèle hiérarchisé appliquée à notre exemple de la pièce-test fabriquée en projection de poudre sur une machine CLAD.

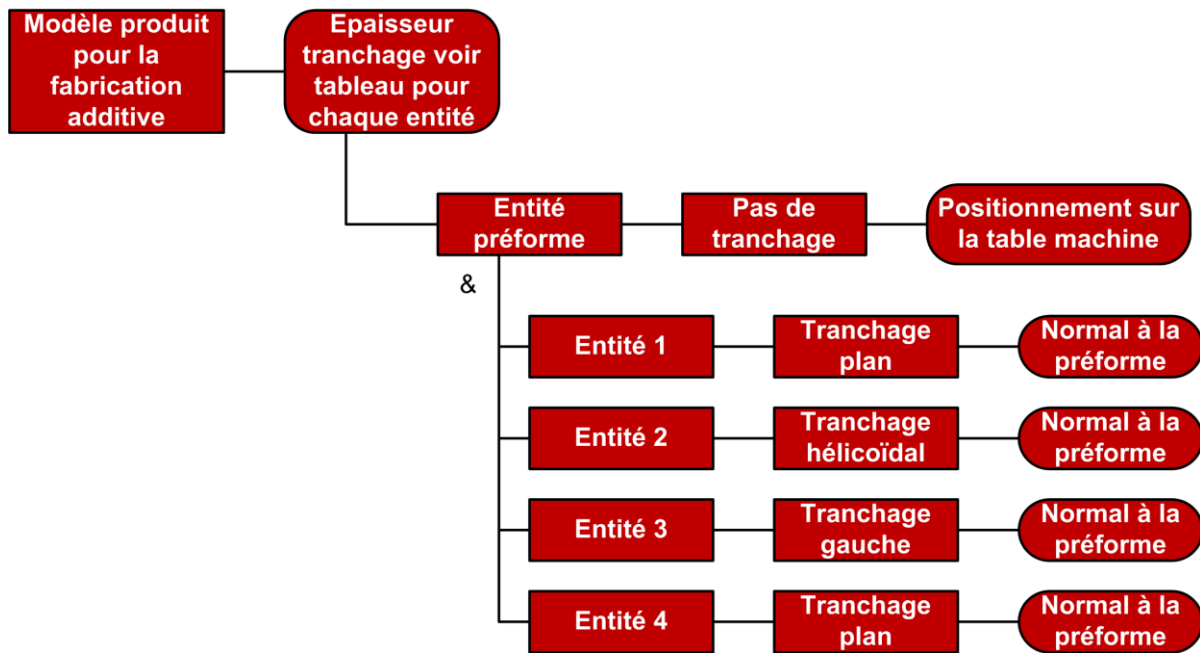


Figure 66 : Description du modèle produit pour la pièce-test

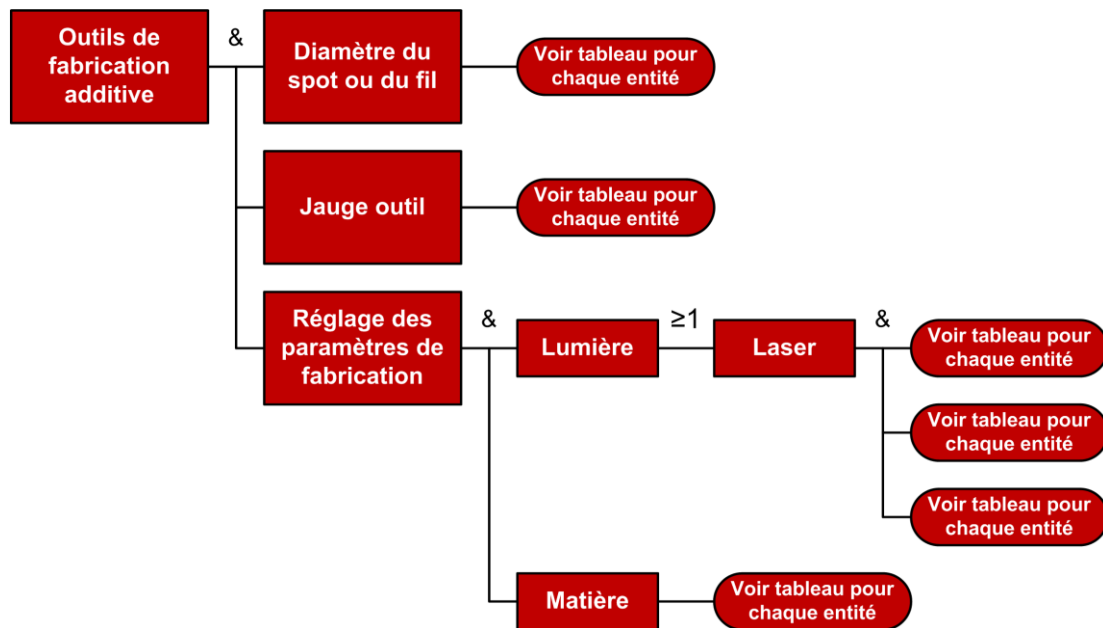


Figure 67 : Description des outils de fabrication additive

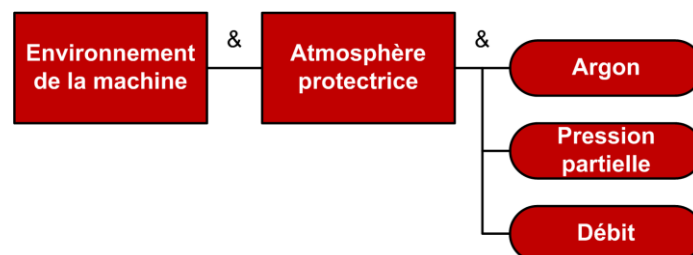


Figure 68 : Paramètres de la chambre de la machine

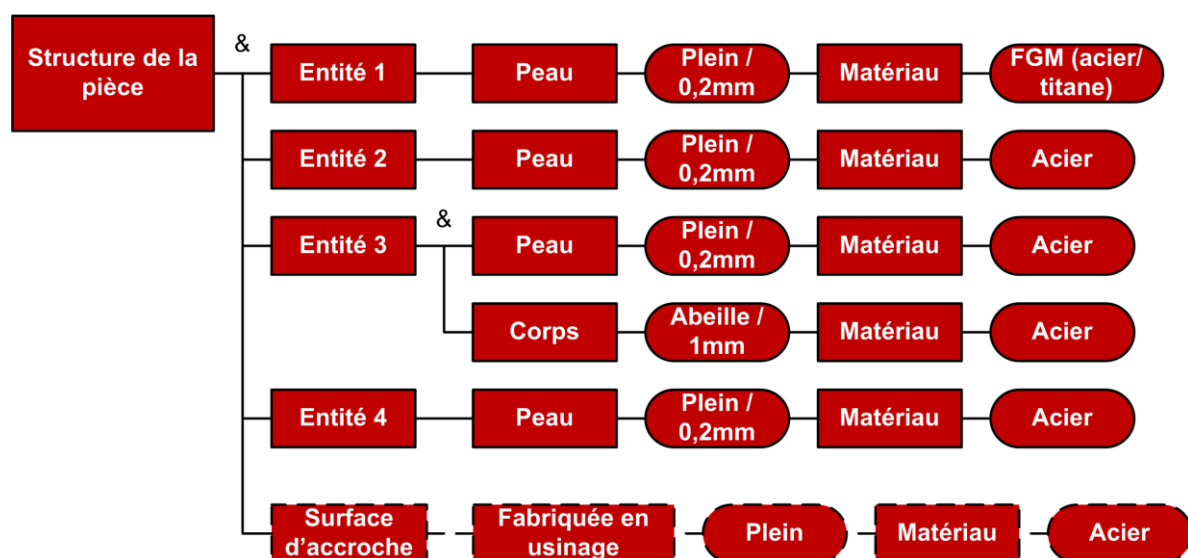


Figure 69 : Structure de la pièce-test

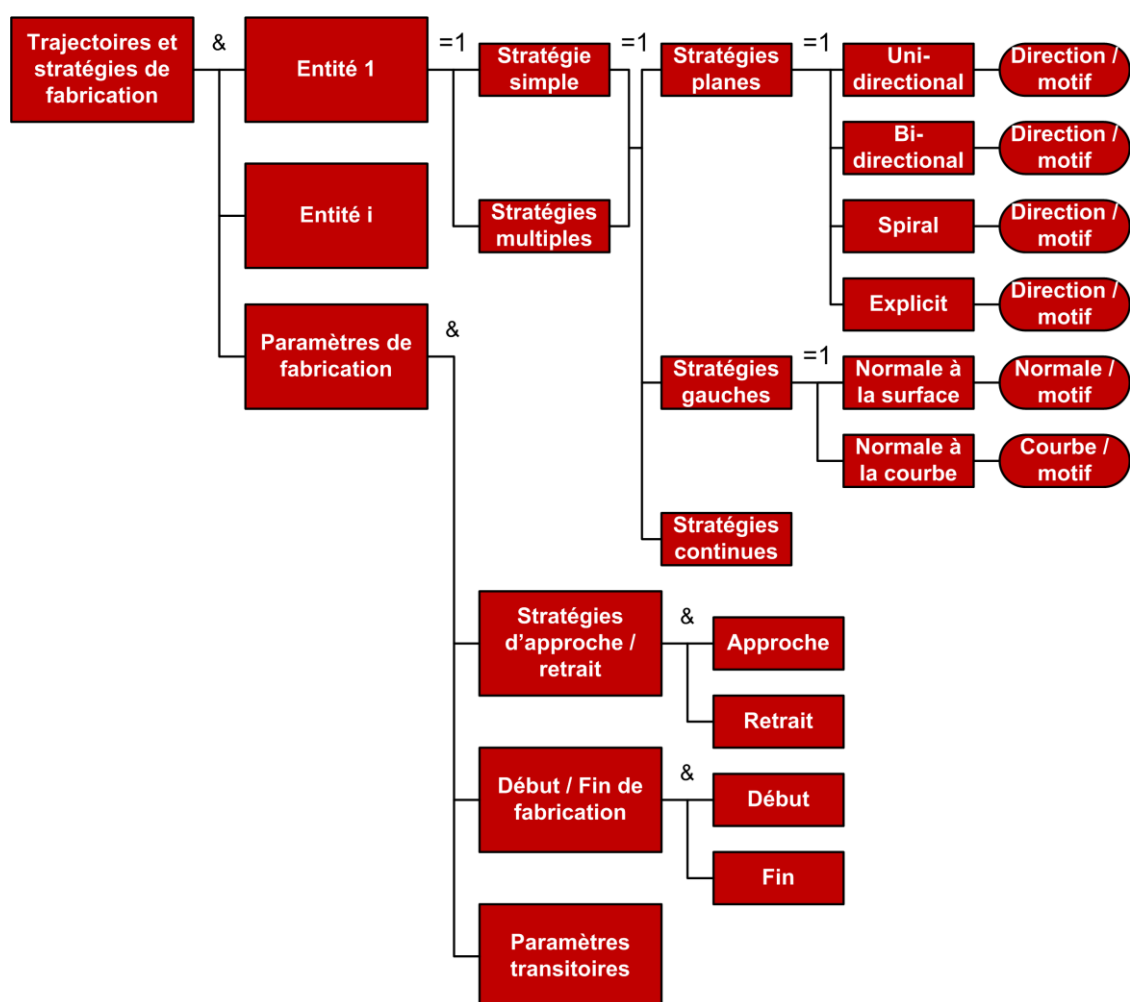


Figure 70 : Description des trajectoires et stratégies de fabrication additive pour la pièce-test

Le cinquième niveau du modèle est l'obtention d'un programme pour le DCN de la machine de fabrication additive. Sur ce modèle, on retrouve la structure du programme ainsi que les fonctions de la commande numérique qui sont programmées dans le langage de

programmation du standard qui est choisi. On retrouve également la gamme de fabrication qui ordonnance les différentes opérations de fabrication additive à réaliser.

On retrouve toutes ces informations structurées dans notre modèle sur la Figure 71, qui représente l'étape 5 du modèle hiérarchisé des données pour de la pièce-test.

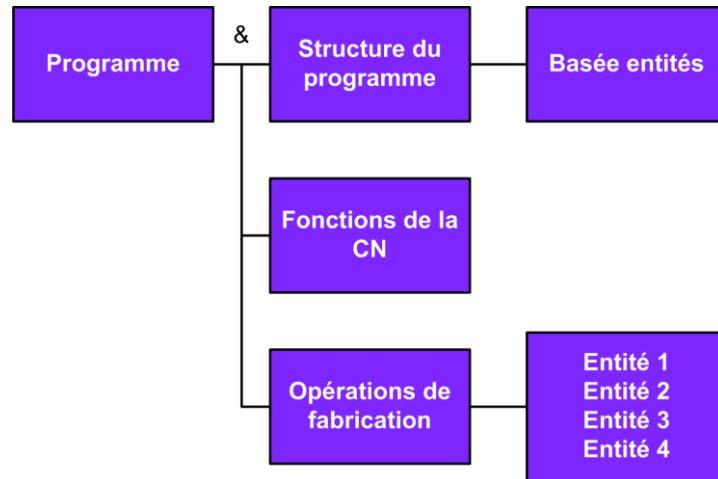


Figure 71 : Description du programme pour la pièce-test

4.5 Troisième partie du modèle de l'exemple

Le sixième niveau du modèle est la définition de la fabrication additive à réaliser. Le modèle permet de mettre en place le suivi de fabrication, avec la possibilité d'implémentation de modules d'optimisation de la fabrication en cours de process.

On retrouve toutes ces informations structurées dans notre modèle sur la Figure 72, qui représente l'étape 6 du modèle hiérarchisé des données pour la pièce-test.

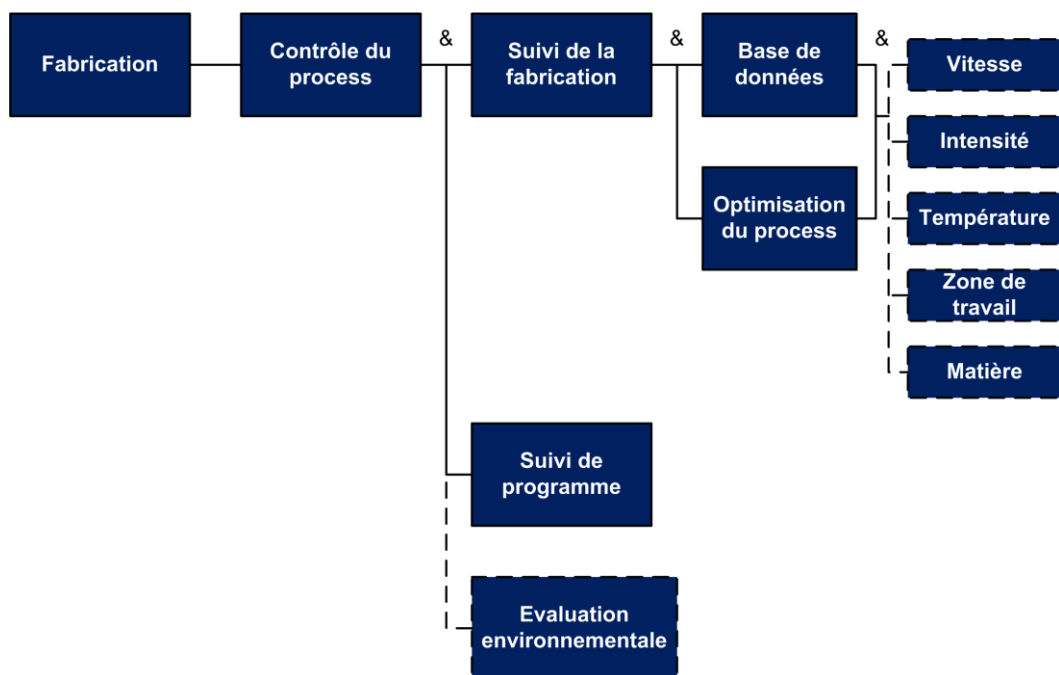


Figure 72 : Modèle pour la fabrication de notre pièce-test

Le septième niveau du modèle est la définition de la post-production après la fabrication de la pièce-test. Cette étape est décomposée en trois parties : les opérations de finition, les opérations de métrologie et les opérations de développement durable.

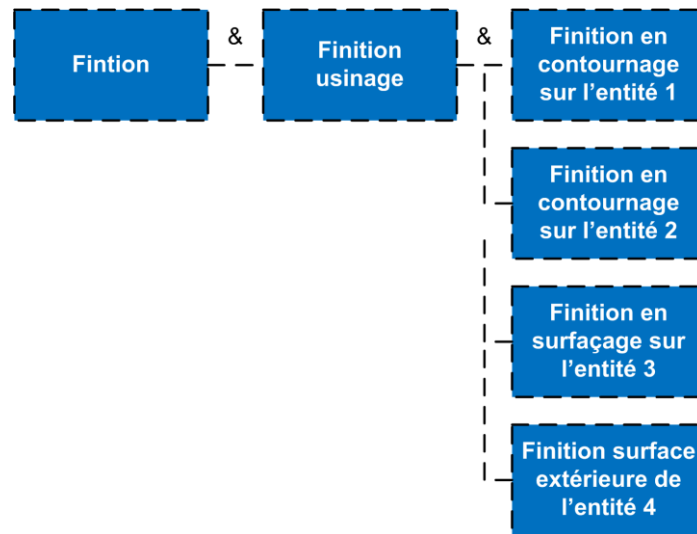


Figure 73 : Modèle pour la finition de la pièce-test

On retrouve toutes ces informations structurées dans notre modèle sur les figures suivantes : Figure 73, Figure 74 et Figure 75, qui représentent la dernière étape de notre modèle hiérarchisé appliquée à notre exemple de la pièce-test fabriquée en projection de poudre sur une machine CLAD.

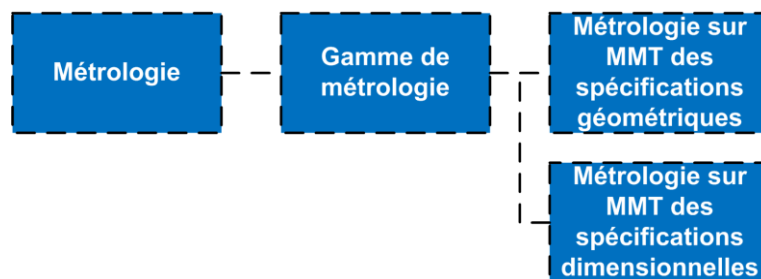


Figure 74 : Modèle de métrologie de notre pièce-test

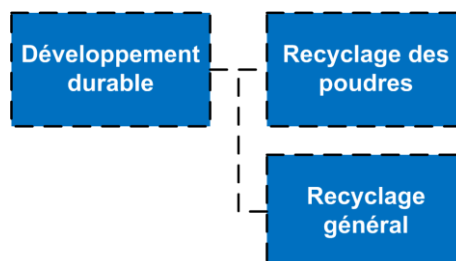


Figure 75 : Modèle de post-production de notre pièce-test

4.6 Synthèse sur l'exemple

Cet exemple de notre pièce-test appliqué à notre modèle hiérarchisé des données, nous permet de conclure sur trois points :

- Notre modèle est bien complet et permet de décrire entièrement un projet de fabrication additive.
- Il nous a permis de valider les apports de notre modèle par rapport aux possibilités actuelles avec le format STL : unique modèle pouvant décrire des pièces fabriquées en FGM, utilisant des supports préformés, possibilité de réglage de la fabrication plus fine avec une description par entités de fabrication...
- Ce modèle est l'étape qui précède la standardisation ce qui permettra de rendre opérationnel ce modèle pour la réalisation de projet de fabrication additive.

De plus, sur cet exemple, on peut constater que notre modèle basé-entités permet d'obtenir une structuration des données intéressante et de hiérarchiser les données les unes par rapport aux autres. Cette structure du modèle nous permet rapidement de définir toutes les données nécessaires à un projet de fabrication additive et de les organiser. Lorsque ce modèle sera intégré dans un standard de données basé-entités, cela permettra d'avoir un programme avec une structure compréhensible et de pouvoir ajouter des entités au pied de la machine.

5. Points forts du nouveau modèle d'organisation des données numériques

Le modèle complet et hiérarchisé que nous avons proposé dans ce chapitre propose d'apporter des réponses à plusieurs manques du modèle actuel. Ce modèle permet de décrire des pièces réalisées en multi-matériaux (FGM), des pièces réalisées sur supports préformés, ou d'avoir des informations aussi bien géométriques que sur les propriétés mécaniques des matériaux utilisés. De plus, ce modèle propose de garder des informations de haut niveau conceptuel au niveau des directeurs de commande numérique. Ceci nécessite d'avoir des directeurs de commande numérique génériques et non plus propriétaires ; le fait de garder des informations de haut niveau conceptuel permet d'avoir plus d'intelligence au niveau de la machine.

Ce modèle est aussi un modèle qui se veut générique et qui s'intègre parfaitement dans une chaîne numérique complète. Ce nouveau concept pour les procédés de fabrication additive (par rapport aux solutions propriétaires actuelles), permet à ces procédés d'avoir une préparation de la fabrication générique (sur des solutions assistées par ordinateurs non propriétaires). Par ailleurs, ce concept permet à notre modèle de pouvoir être implémenté sur tous les types de machines de fabrication par ajout de matière équipées avec un DCN générique (voir Figure 76). Le modèle que nous proposons, permet aussi d'avoir dans le même modèle toutes les informations liées à la métrologie et aux opérations de finition (niveau 7 de notre modèle hiérarchisé des données). Cet apport permet de ne pas multiplier le nombre de modèles et donc d'éviter la redondance dans les informations, l'utilisation de post-processeurs ou les conversions de fichiers numériques

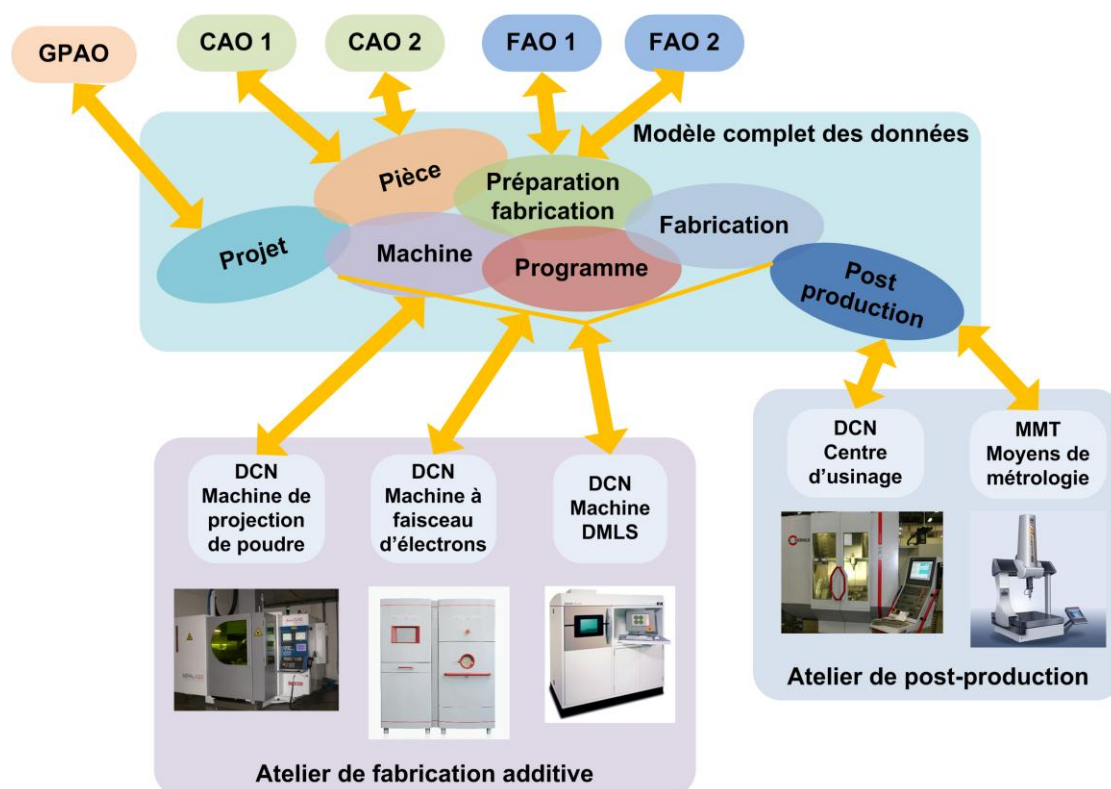


Figure 76 : Modèle complet des données dans une chaîne numérique complète

Enfin, le modèle que nous proposons est un modèle qui s'appuie sur une description basée-entités. Cette structure basée-entités présente plusieurs avantages : tout d'abord de pouvoir facilement hiérarchiser les informations les unes par rapport aux autres, et ensuite de pouvoir enrichir le modèle avec de nouvelles entités sans pour autant remettre en cause le modèle dans sa globalité. De plus, la réalisation d'un modèle basée-entités facilitera l'intégration de ce modèle dans un standard de données dont la programmation est basée-entités.

La prochaine étape à partir de ce modèle complet et hiérarchisé est désormais la proposition d'intégration de ce modèle dans un standard de haut niveau conceptuel. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2 de ce manuscrit, le standard STEP-NC est un standard intéressant pour l'intégration des procédés de fabrication additive. Ce standard est un standard dont la programmation est basée-entités, ce qui facilitera l'intégration de notre modèle hiérarchisé des données. Nous proposerons par conséquent dans le chapitre 4 de ce manuscrit un nouveau modèle STEP-NC pour les procédés de fabrication par ajout de matière, qui sera réalisé à partir des informations du modèle hiérarchisé des données.

Chapitre 4

Nouveau modèle ISO 14649 pour la fabrication additive

1. Introduction

Une étude bibliographique s'intéressant aux procédés de fabrication additive, nous a permis de mettre en évidence la nécessité de proposer un nouveau standard de données pour ces procédés. Nous avons donc au chapitre 1 de ce manuscrit défini une méthodologie générale pour la proposition d'un tel modèle.

Dans le chapitre 3, nous avons proposé un nouveau modèle complet et hiérarchisé des données des procédés de fabrication par ajout de matière (étape 2 de notre méthodologie générale). En parallèle, une étude bibliographique, nous a permis d'établir que le standard STEP-NC (ISO 14649) est le standard avec une programmation basée-entités le plus abouti actuellement pour les procédés de fabrication. Il permet également de s'affranchir des nombreux défauts liés au standard utilisé actuellement en fabrication additive et est intéressant pour obtenir une nouvelle chaîne numérique en fabrication additive (étape 3 de notre méthodologie générale).

Ce chapitre 4, va donc être l'occasion de proposer un nouveau modèle ISO 14649, pour les procédés de fabrication par ajout de matière (étape 4 de notre méthodologie générale). Le nouveau modèle que nous proposons ici intègre toutes les données définies dans notre modèle hiérarchisé.

La norme ISO 14649 existe déjà pour les procédés de fabrication par enlèvement de matière (fraisage, tournage et électroérosion), et aucune donnée de fabrication additive n'y est intégrée. Notre modèle devra donc satisfaire pleinement la structuration des données déjà intégrées dans ce standard. Nous commencerons donc notre étude par une analyse de la structure actuelle de la norme ISO 14649. Puis nous ferons une proposition de nouvelle structuration pour intégrer dans cette norme notre nouveau modèle. Une fois cette nouvelle structuration définie, nous proposerons une méthodologie pour la proposition d'un nouveau modèle ISO 14649 pour la fabrication additive.

Pour conclure ce chapitre, nous montrerons quels sont les apports en fabrication additive de l'utilisation du standard STEP-NC par rapport à la situation actuelle. Enfin, nous montrerons la nécessité de développer une plateforme STEP-NC fabrication additive, pour valider le modèle proposé dans ce chapitre.

2. Organisation des données dans la norme ISO 14649

Dans ce chapitre, notre but étant d'obtenir un nouveau modèle STEP-NC pour les procédés de fabrication additive, il est donc important dans un premier temps d'analyser les principaux objectifs de la norme et sa structuration des données. Cette étude est réalisée dans les paragraphes suivants.

2.1 Principaux objectifs de la norme ISO 14649

La norme STEP-NC (ISO 14649) est une norme organisée autour de plusieurs *parts*. L'organisation générale de la norme ISO 14649 est définie au niveau de sa *part 1* [ISO03]. Le début de la *part 1* est consacré à la définition des principaux termes employés, ainsi qu'au référencement des normes auxquelles l'ISO 14649 fait appel (ISO 10303...). A la suite de ces définitions, on a une présentation de l'ISO 14649 elle-même, avec le rappel des principaux buts de cette norme :

- Satisfaire les besoins actuels et futurs de l'échange de données en fabrication.
- Supporter l'utilisation directe des informations sur les modèles de données générés par l'ISO 10303 [ISO94a].
- Créer un modèle de données échangeables, qui soit orienté objet, pour la commande numérique des machines outils.
- Utiliser un langage standard, moderne et des librairies pour l'implémentation du modèle de données.
- Assurer la compatibilité des données d'entrée de la commande numérique.

2.2 Organisation de la norme ISO 14649

Après ces rappels sur les objectifs de la norme, la *part 1* [ISO03] définit les grands axes de l'organisation de la norme ISO 14649.

La Figure 77 montre les différents cycles de vie d'un projet de fabrication, depuis la définition de la conception du produit jusqu'à la fabrication. On retrouve sur cette figure, comment la norme ISO 14649 est utilisée dans ce cycle. Sur la Figure 77 ont été ajoutés les procédés d'Additive Manufacturing par rapport à la situation actuelle car avant nos travaux aucun modèle de fabrication additive n'existait. Le choix au niveau du comité de l'ISO (auquel nos travaux contribuent) est de développer les spécificités des procédés par ajout de matière dans une nouvelle *part* de la norme ISO 14649 : la *part 17* (au même niveau que les procédés par enlèvement de matière : fraisage *part 11* [ISO04b], tournage *part 12* [ISO04c] et électroérosion *parts 13* [ISO04d] et *14* [ISO04e]). La phase de conception aboutit à la définition d'un modèle CAO (souvent défini en ISO 10303-203) et inclut toutes les entités de fabrication définies en ISO 10303-224. Ensuite le réglage de la fabrication peut être fait sur chacune des entités de fabrication définies précédemment par la norme ISO 10303-224. Cette étape peut être réalisée sur un logiciel de FAO. A partir de ces informations, le modèle ISO 14649 est généré et peut être exécuté sur un directeur de commande numérique qui sache gérer le format STEP-NC.

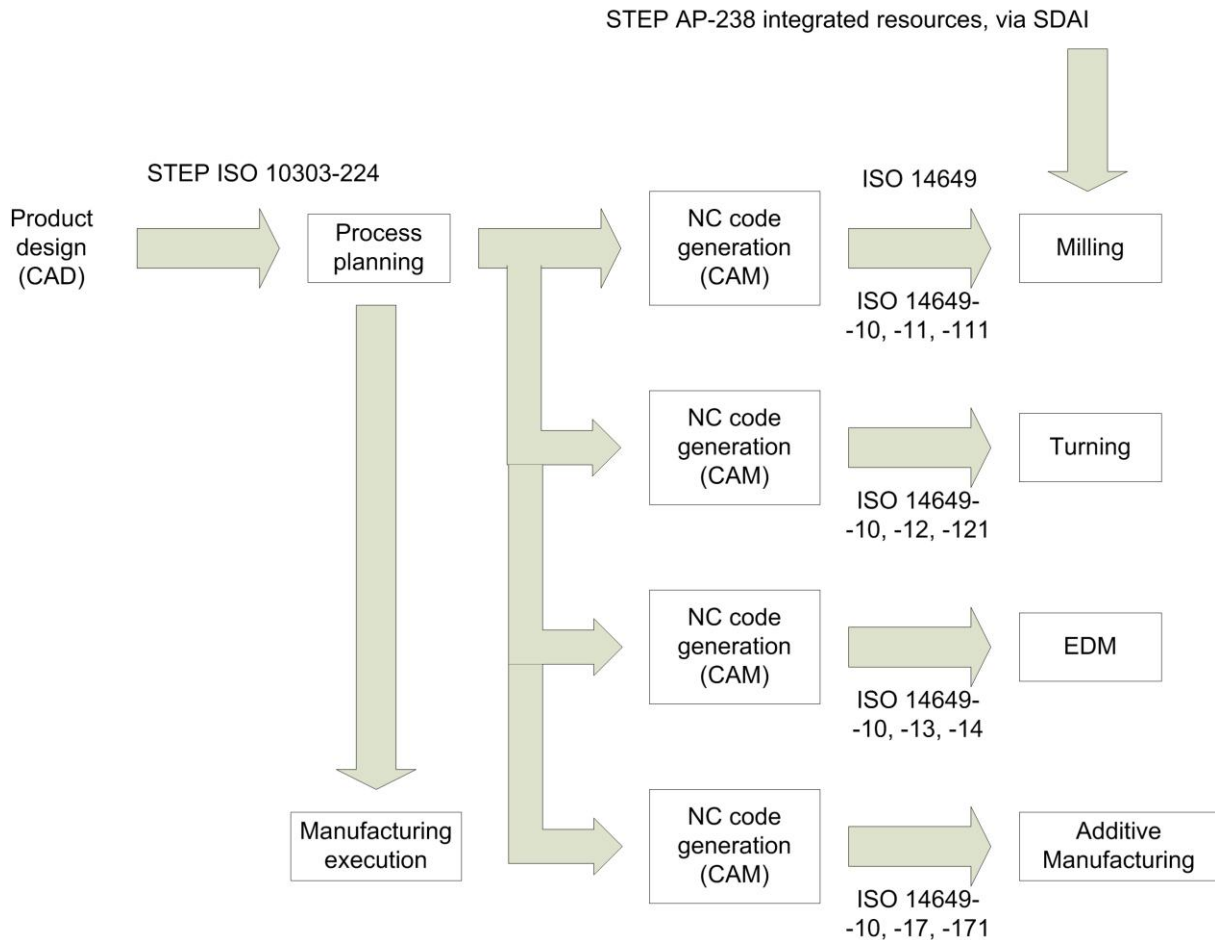


Figure 77 : Cycle de fabrication et utilisation de la norme ISO 14649 dans ce cycle [ISO03a]

L'un des principes fondamentaux du modèle de données ISO 14649 est sa programmation orientée-objet, à partir des entités de fabrication (*features*). Ainsi à chaque entité de fabrication sont associés ses paramètres de fabrication. Le modèle de données est lui basé sur des relations entre différentes classes d'entités qui sont définies dans l'ISO 14649.

Le modèle de données contient des données sur la géométrie, les entités de fabrication et le procédé de fabrication. Les informations géométriques permettent de définir entièrement la pièce finie après fabrication. Les données sur les entités de fabrication qui sont généralement issues du modèle FAO sont définies dans la norme ISO 14649. Dans cette partie, il est précisé que l'ISO 14649 fait appel aux entités de fabrication décrites dans l'ISO 10303-224 [ISO01] et -214 [ISO03b]. Les informations sur le procédé de fabrication sont également issues du modèle FAO et permettent de définir toutes les informations sur les paramètres inhérents à la fabrication. Dans les informations sur le procédé de fabrication, les différentes phases de fabrication sont définies (*Workingsteps*), à chaque entité de fabrication est associé un *Workingstep*, avec la définition des paramètres de fabrication, l'outil, et l'ordonnancement du *Workingstep*. La gamme de fabrication (*Workplan*) définit toute l'organisation des phases de fabrication. Cette organisation est définie sur la Figure 78.

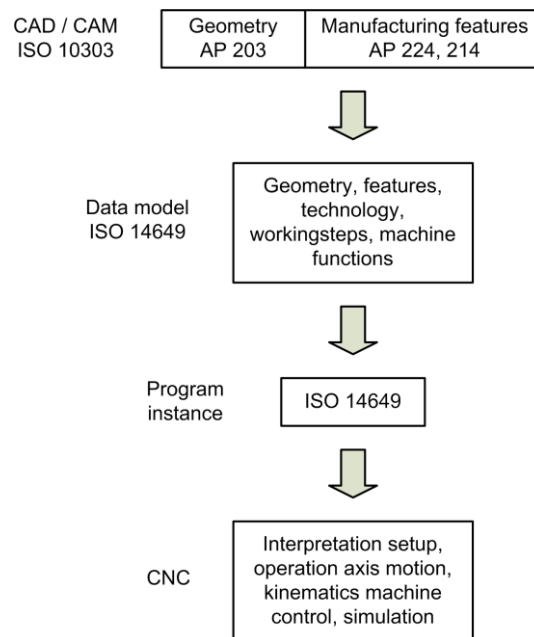


Figure 78 : Description générale du modèle de données [ISO03a]

Dans, la *part 1* de l'ISO 14649, il est présenté toute l'organisation générale des normes de description des procédés de fabrication (ISO 14649 *parts 10, 11, 12, 13, 14...*). La structure plus détaillée de l'ISO 14649 y est aussi définie et est présentée dans le paragraphe suivant (Figure 80). Certains changements sont à effectuer au niveau de cette *part 1* pour y introduire la notion de procédés par ajout de matière, car à l'heure actuelle seuls les procédés par enlèvement de matière sont présents dans la norme ISO 14649.

Dans cette partie de la norme sont détaillés aussi le rôle et la position de la norme ISO 14649 par rapport aux normes ISO 10303-224 et -238 (Figure 79) : la norme ISO 10303-238 [ISO07] (Application Interpreted Model) regroupe les informations du protocole AP-224 de la norme ISO 10303 et les informations de la norme ISO 14649 (Application Reference Model). La norme ISO 10303-224 [ISO01] définit toutes les entités de fabrication pour les procédés d'usinage, tandis que la norme ISO 14649 définit les informations présentes au niveau des directeurs de commande numérique des machines de fabrication. Des changements au niveau de ces normes pour l'introduction des procédés de fabrication additive dans la norme STEP seront donc à envisager.

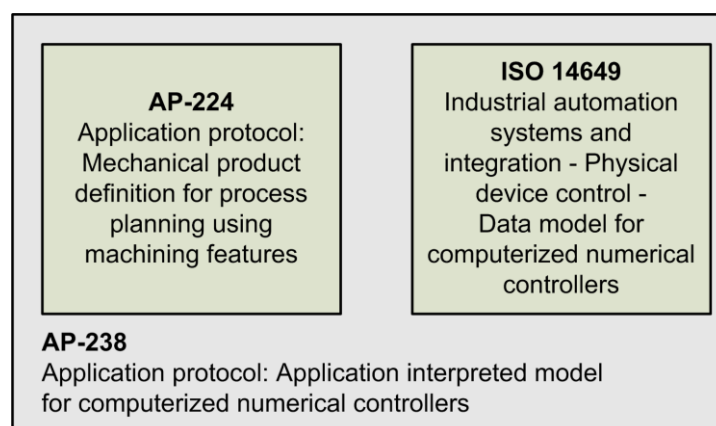


Figure 79 : Organisation des normes STEP [ISO03a]

2.3 Structure générale de l'ISO 14649

La norme ISO 14649 (STEP-NC) a une organisation verticale. En effet, les grands principes et définitions sont donnés dans la *part 1*, puis on retrouve la *part 10* qui donnent des informations générales sur les procédés d'usinage. A partir de cette *part 10*, on retrouve les *parts 11 à 14* qui donnent des informations spécifiques sur chacun des procédés :

- *Part 11* : fraisage.
- *Part 12* : tournage.
- *Parts 13 et 14* : électroérosion.

Puis les *parts 11 et 12* sont complétées respectivement par les *parts 111 et 121* qui donnent des informations sur leurs outils spécifiques (de fraisage et tournage). On ne retrouve pas de *part 131*, car les outils spécifiques à l'électroérosion sont décrits directement dans la *part 13*. Toute cette organisation est décrite sur la Figure 80.

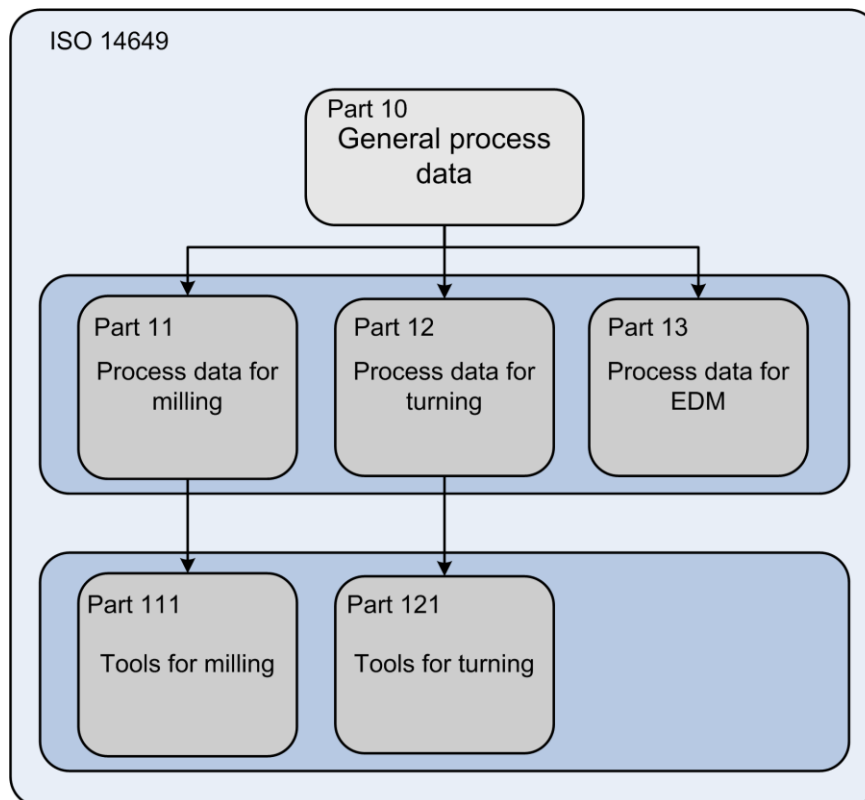


Figure 80 : Organisation actuelle de l'ISO 14649

Maintenant que l'organisation et la structuration des données de l'ISO 14649 ont été définies. Il faut désormais mettre en place une stratégie et ensuite une méthodologie pour la proposition d'un nouveau modèle ISO 14649 pour les procédés de fabrication par ajout de matière. Ce nouveau modèle ISO 14649 devra parfaitement s'intégrer dans la norme qui a déjà été définie pour les procédés de fabrication par enlèvement de matière : en gardant la même structuration des données et la même philosophie. Il devra également incorporer toutes les données spécifiques à la fabrication additive : en développant de nouveaux modèles. Toutes nos propositions dans ce sens, ainsi que les choix que nous avons faits, sont présentés dans la suite de ce chapitre.

3. Stratégie d'introduction des procédés de fabrication additive dans la norme ISO 14649

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que la *part 1* définissait le rôle et l'organisation générale de l'ISO 14649. Nous avons donc pu voir que la *part 10 [ISO04a]* (description générale des procédés de fabrication) était commune à tous les procédés pour l'instant présents dans l'ISO 14649. Nous allons donc nous intéresser plus en détail à cette *part* de la norme dans la suite de cette partie. Cela nous permettra dans la suite de pouvoir mettre en place une stratégie pour l'introduction de la fabrication additive dans la norme ISO 14649.

3.1 Présentation de la norme ISO 14649 part 10

Cette partie de la norme concerne la définition générale des procédés de fabrication. Dans l'état actuel des choses, on trouve des informations et des données uniquement pour les procédés d'usinage (fraisage, tournage et électroérosion). Cependant, une grande partie de ces informations pourront servir de base de description pour les procédés de fabrication additive, mais des informations complémentaires devront être intégrées pour ces derniers procédés (les différentes solutions d'intégration de ces nouvelles données sont décrites par la suite sur les Figure 81 et Figure 82).

A la suite de ces définitions, on retrouve le cœur de la norme qui est organisé en plusieurs parties :

- Définition du workpiece : c'est la définition du brut d'usinage. Dans la norme ISO 14649, on part toujours d'un brut (parallélépipédique, cylindrique ou préformé) auquel on vient soustraire différentes entités d'usinage. Cette partie ne pourra pas s'appliquer aux pièces réalisées en fabrication additive, car pour ces procédés, on ajoute de la matière. De plus, ces workpieces ne sont composés que d'un seul matériau, or avec les procédés par ajout de matière on peut réaliser des pièces en multimatériau. La définition même des pièces fabriquées par ajout de matière devra donc être revue pour l'ISO 14649 (absence de brut), ce qui nécessitera la définition d'un nouveau AM_workpiece.
- Définition des entités de fabrication, Manufacturing_features: c'est la définition des entités de fabrication pour le fraisage. Ces entités sont des entités 2D1/2. On ne retrouve que des informations sur la définition géométrique de ces entités et non sur la manière dont elles sont fabriquées (ces informations sont données dans les parties spécifiques *parts 11 à 14*). En revanche lors de la définition de ces entités, il est très souvent fait référence au fait qu'elles sont soustraites du brut (workpiece). Il faudra donc compléter la norme pour que celles-ci puissent être utilisées pour la description de pièces réalisées en fabrication additive (celles utiles pour la description de pièce de fabrication).
- Définition des exécutoires: cette partie est divisée en trois sous-parties. Tout d'abord la définition du workingstep qui correspond aux phases d'usinage (elles sont indépendantes). Puis le workplan, qui représente la gamme d'usinage et donc l'organisation des phases d'usinage. Et enfin les fonctions de la commande numérique (CN) qui n'agissent pas directement sur les axes de la CN. Pour l'adaptation de cette partie de la norme pour la

fabrication additive, on pourra conserver une grande partie des informations, il faudra juste y ajouter la notion d'ajout de matière dans les phases de fabrication.

- Définition des opérations: on retrouve ici la spécification des différentes opérations de fabrication. Chacune des opérations définies dans un projet de fabrication est toujours associée à une entité. Cette partie est divisée en deux sous-parties : la première qui, globalement, donne la définition des opérations d'usinage ; et la seconde qui spécifie les opérations de fraisage en particulier. Les opérations spécifiques de tournage et d'électroérosion sont définies dans les *parts 12 à 14*. Dans la définition générale des opérations de fabrication, il faudra ajouter la possibilité d'avoir des opérations de fabrication additive. Le détail de ces opérations sera lui réalisé dans la *part 17*.

- Définition des trajectoires outils explicites: dans cette partie on a une description des trajectoires explicites suivant la norme ISO 14649. Elles offrent la possibilité de décrire des trajectoires outils avec des stratégies non présentes dans la bibliothèque des trajectoires de l'ISO 14649. Cette partie pourra être adaptée pour la fabrication additive (en ne parlant pas d'outil de coupe mais de laser ou autres).

- Règles: définitions de différentes règles de l'ISO 14649.

- On a ensuite une définition des différents termes en langage EXPRESS, les abréviations des termes définis auparavant et des schémas EXPRESS-G à titre d'information. Les informations inhérentes à la fabrication additive devront aussi être ajoutées dans ces parties.

3.2 Stratégies d'intégration des données de fabrication additive dans la norme ISO 14649

Notre objectif pour la proposition d'intégration des procédés de fabrication par ajout de matière dans la norme ISO 14649 est d'une part de respecter la philosophie et la structure actuelle, et d'autre part d'avoir un modèle le plus simple possible et identifiable dans la norme. Pour cela nous allons proposer plusieurs stratégies pour la proposition d'un nouveau modèle ISO 14649 fabrication additive.

D'après nous, deux stratégies peuvent être envisagées pour l'intégration des procédés par ajout de matière dans l'ISO 14649. Une première (Figure 81) qui conserverait une seule et unique *part 10* pour les deux types de technologies (usinage et fabrication additive), puis à l'étage en dessous les différentes parties spécifiques à chacun des procédés (fraisage *part 11*, tournage *part 12*, électroérosion *part 13* et fabrication additive *part 17*), et une deuxième (Figure 82) qui différencierait les deux types de technologie dès la *part 10* , avec une *part 10a* pour l'usinage (*part 10* actuelle) et une *part 10b* pour la fabrication additive, puis à l'étage inférieur les mêmes parts que pour l'autre stratégie.

Les avantages et inconvénients des différentes stratégies sont détaillés dans le Tableau 5 :

	Avantages	Inconvénients
Stratégie 1	AM sur le même plan que l'usinage (pas de hiérarchie usinage / fabrication additive) Spécificités de la fabrication additive réunies dans la <i>part 17</i> ce qui les met en avant Structure identique plus importante : intéressant dans le cadre d'une plateforme multi-procédé	Insertion des données générales de la fabrication additive dans la <i>part 10</i> avec l'usinage plus complexe à mettre en œuvre Spécificités de l'AM dans la <i>part 10</i> peuvent être moins visibles par rapport à l'usinage (ex : AM_workpiece)
Stratégie 2	Rédaction de la norme facilitée Plus grande visibilité des procédés par ajout de matière	Divergence trop rapide AM, usinage Oblige à réécrire toute une <i>part 10b</i> qui est redondante sur beaucoup de points avec la <i>part 10a</i>

Tableau 5 : Tableau récapitulant les avantages et inconvénients des stratégies d'introduction de la fabrication dans la norme ISO 14649

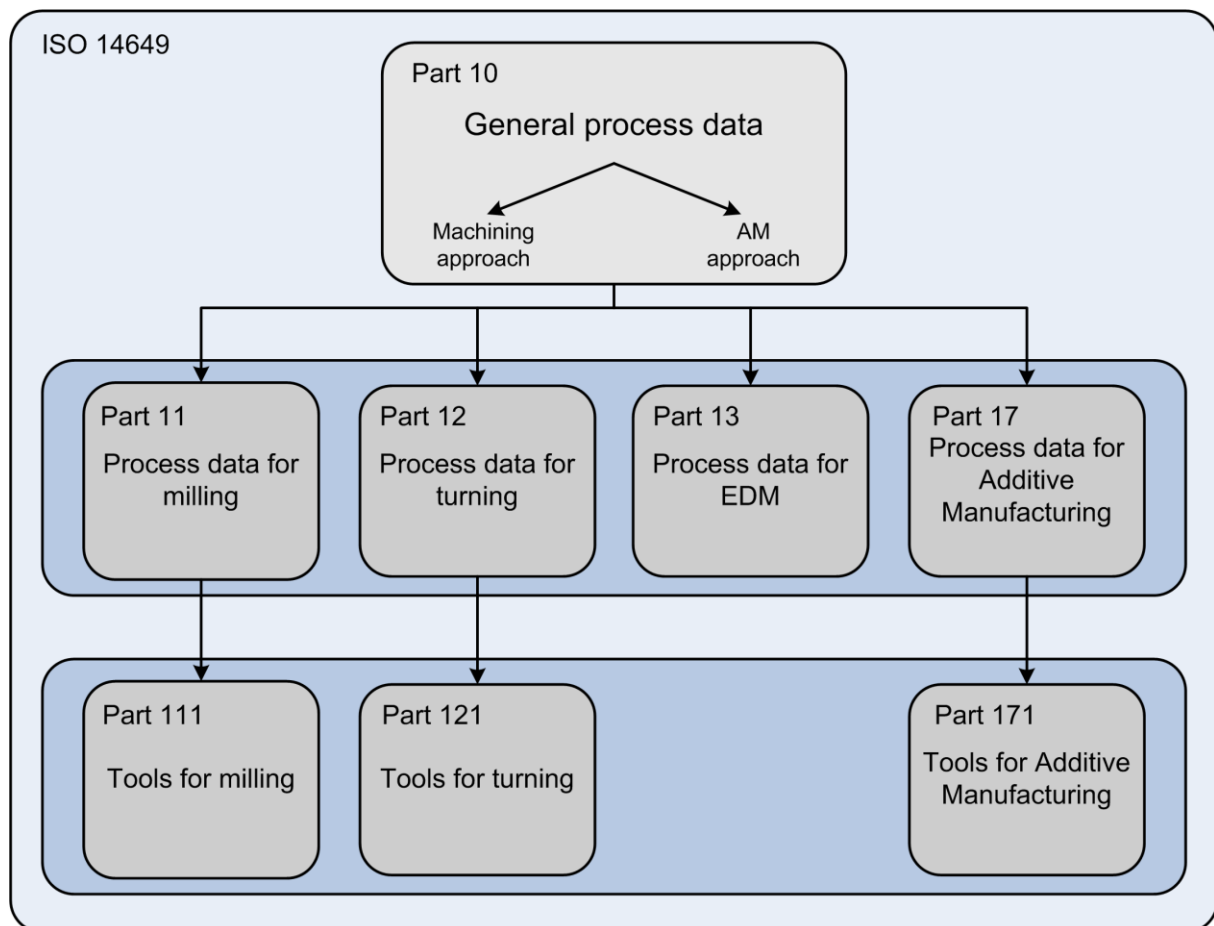


Figure 81 : Proposition 1 pour l'introduction des données d'additive manufacturing dans l'ISO 14649

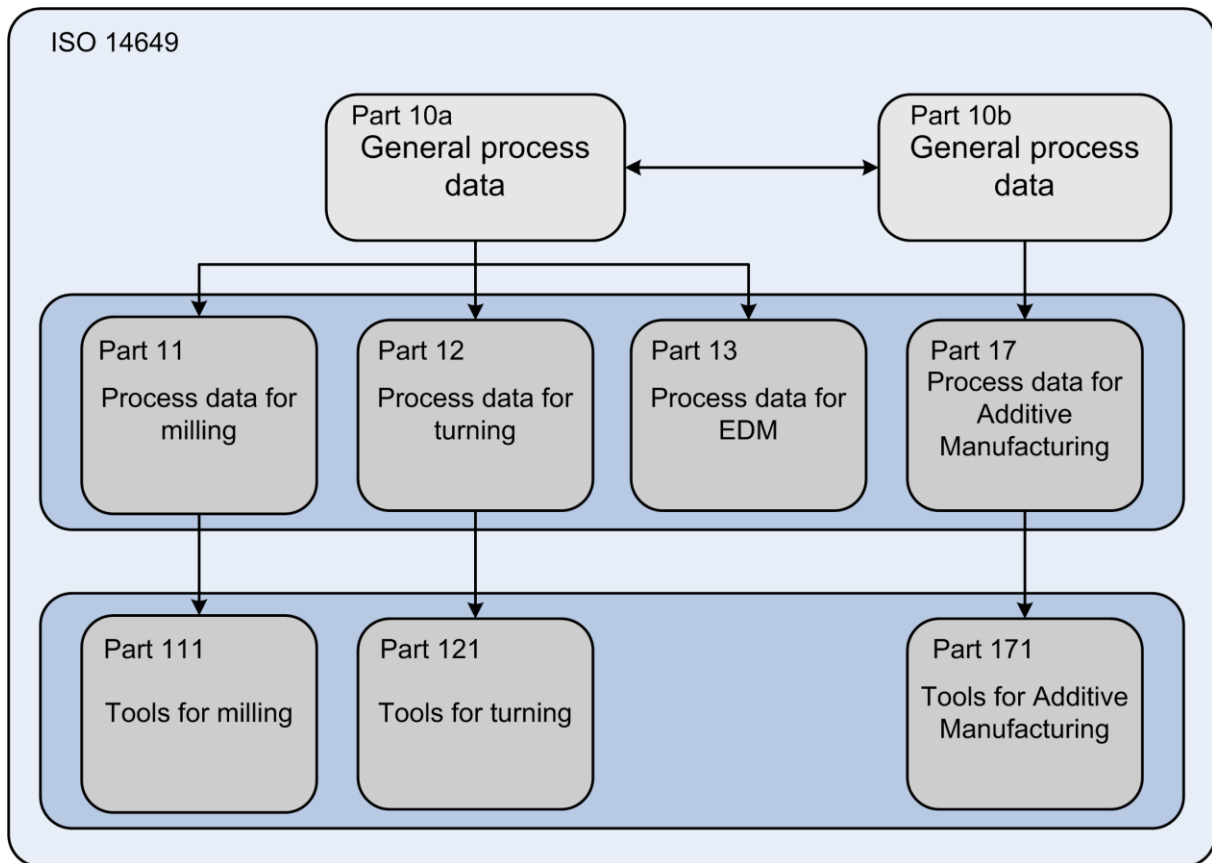


Figure 82 : Proposition 2 pour l'introduction des données d'additive manufacturing dans l'ISO 14649

La solution retenue que nous proposons pour l'intégration des données sur les procédés par ajout de matière dans la norme STEP-NC est la solution 1. Elle place, en effet, les procédés de fabrication par ajout de matière au même niveau hiérarchique que l'usinage et réutilise une grande partie de la *part 10* déjà établie. Ceci est un gros avantage dans l'optique de garder la même philosophie de norme pour les procédés par ajout et enlèvement de matière. De plus, les spécificités de la fabrication additive peuvent rapidement être identifiées au niveau de la *part 17*. Le fait d'avoir une structure unique de description des procédés de fabrication (ajout et enlèvement de matière) au niveau de la *part 10* est également très intéressante pour le développement de la fabrication multi-procédés s'appuyant sur une chaîne numérique STEP-NC.

4. Proposition de modèle STEP-NC pour la fabrication additive

4.1 Méthodologie pour la proposition d'un modèle ISO 14649 pour la fabrication additive

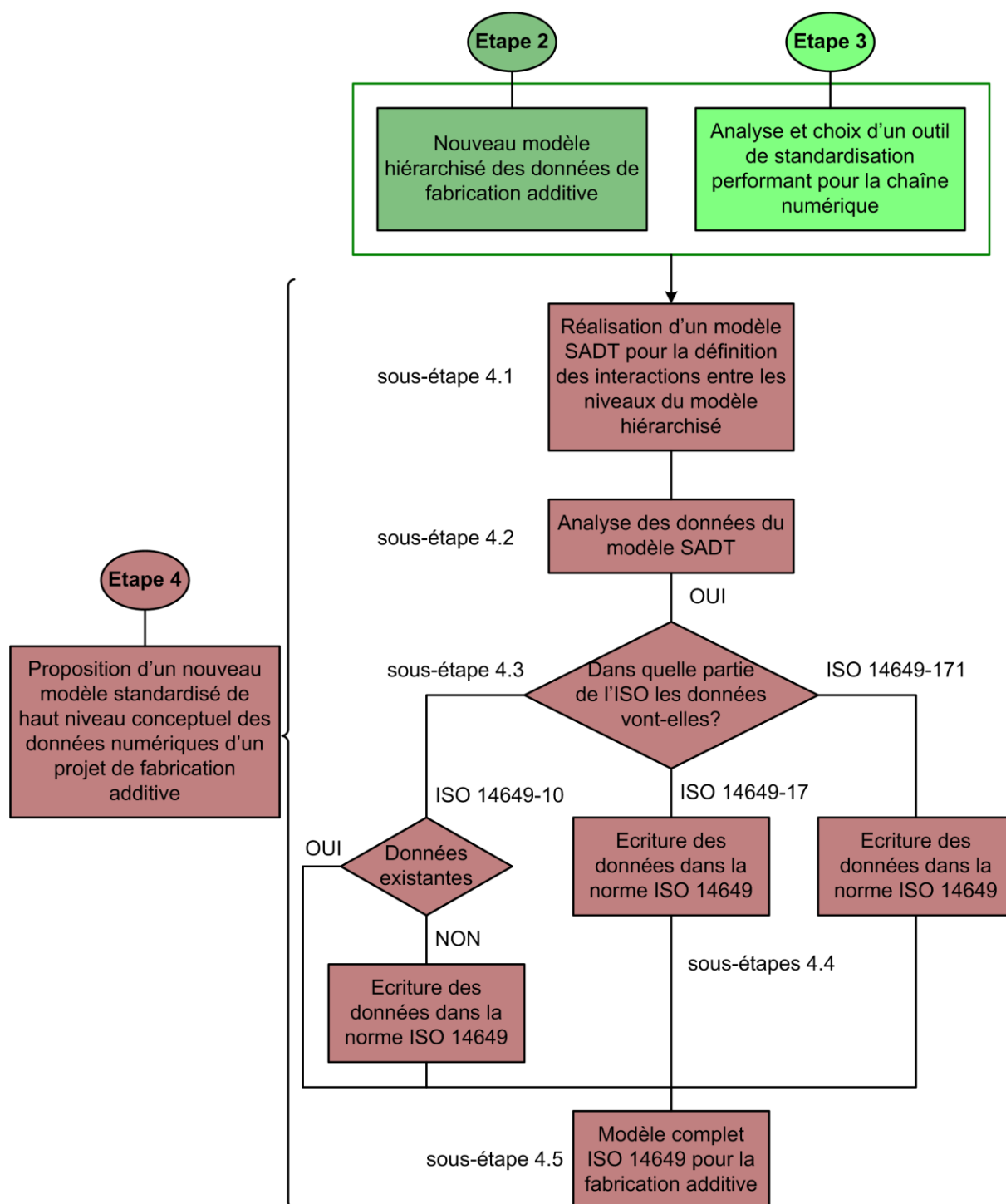


Figure 83 : Méthodologie d'obtention d'un modèle complet de fabrication additive

Le nouveau modèle de données ISO 14649 pour la fabrication additive, que nous proposons dans nos travaux, est obtenu à partir des données du modèle hiérarchisé (modèle

obtenu à l'étape 2 de notre méthodologie générale) et de la structure de la norme ISO 14649 (standard choisi à l'étape 3 de notre méthodologie générale). Le principe de la méthode que nous avons développée pour la proposition de ce modèle de données est présenté sur la Figure 83.

La première sous-étape 4.1 de notre méthode permet d'obtenir un modèle SADT. Ce modèle SADT permet de mettre en évidence les interactions et relations entre les différents niveaux du modèle hiérarchisé des données que nous avons proposé dans le chapitre précédent. A partir de ce modèle SADT, la deuxième sous étape 4.2 consiste à analyser le modèle SADT construit auparavant. Cette étape est importante dans la perspective d'introduire les données du modèle dans les *parts* adaptées de la norme ISO 14649. La sous étape 4.3 consiste à déterminer dans quelle *part* de la norme ISO 14649, les informations du modèle hiérarchisé doivent être introduites. Si les informations sont concernées par les *parts 17 ou 171*, alors les données peuvent être écrites pour la norme ISO 14649. Si les informations sont à renseigner dans la *part 10*, alors on vérifie si elles sont déjà présentes dans cette *part*, si ce n'est pas le cas, on les définit pour la norme ISO 14649. Une fois ces sous-étapes 4.4 validées, la définition du modèle complet ISO 14649 des procédés de fabrication additive peut être faite.

4.2 Relations entre les différents niveaux du modèle hiérarchisé

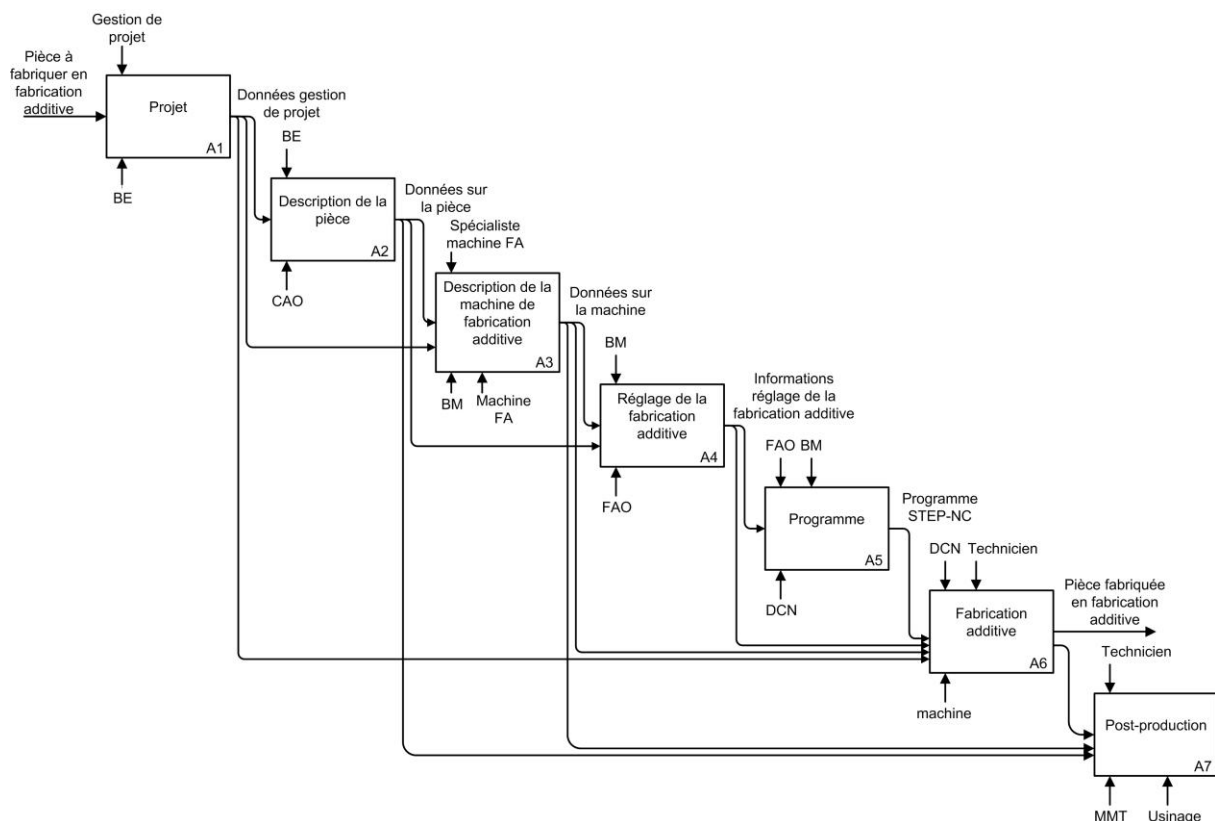


Figure 84 : Modèle SADT des étapes du modèle hiérarchisé

On retrouve sur le modèle SADT (Figure 84) réalisé à partir des informations du modèle hiérarchisé tous les niveaux du modèle hiérarchisé que nous avons définis dans le

chapitre précédent (sous-étape 4.2 de notre méthodologie). C'est à partir de ce modèle qui est hiérarchisé et qui présente les interactions entre ces différents niveaux que le modèle de données STEP-NC pour la fabrication additive est établi. Ce modèle SADT qui présente les mêmes données que notre modèle hiérarchisé, permet de faire les liens entre les différents niveaux du modèle hiérarchisé, tout ceci dans le but d'avoir un modèle complet parfaitement articulé et structuré. Les modèles SADT à des niveaux inférieurs de description ne sont pas présentés ici.

4.3 Données fabrication additive à intégrer dans la norme ISO 14649 et leurs emplacements

Avant de proposer un nouveau modèle ISO 14649, il est important d'identifier dans quelles *parts* de l'ISO 14649 les données du modèle hiérarchisé vont être incorporées (sous-étape 4.3 de la méthodologie). Les différentes *parts* de l'ISO 14649 où seront intégrées les données du modèle hiérarchisé sont identifiées sur le Tableau 6 suivant.

Niveaux du modèle hiérarchisé		Part 10	Part 17	Part 171
Niveau 1 : Projet		X		
Niveau 2 : Description de la pièce	Description géométrique de la pièce	X	X	
	Description non géométrique de la pièce	X		
Niveau 3 : Description de la machine	Technologie de la machine		X	X
	Description géométrique de la machine		X	
	Cinématique / dynamique de la machine		X	
Niveau 4 : Préparation de la fabrication	Modèle produit	X	X	
	Outils : sources d'énergie			X
	Environnement de la machine		X	
	Trajectoires stratégies		X	
	Structure de la pièce		X	
Niveau 5 : Programme		X	X	
Niveau 6 : Fabrication		X	X	
Niveau 7 : Post-production		X		

Tableau 6 : Emplacements des données du modèle hiérarchisé dans l'ISO 14649

4.4 Proposition d'un nouveau modèle ISO 14649 à partir du modèle hiérarchisé

Une fois que la *part* de l'ISO14649, qui accueille les données du modèle hiérarchisé, a été identifiée, la proposition de modélisation de ces données dans le langage de la norme STEP-NC (EXPRESS et EXPRESS-G) peut être faite. Un exemple est présenté dans la suite de ce paragraphe, pour montrer comment le modèle ISO 14649 est obtenu. Les modèles ISO 14649 des autres données présentées dans la suite de ce manuscrit sont obtenus avec le même raisonnement.

Comme, nous l'avons présenté dans le chapitre 2 de ce manuscrit, la norme ISO 14649 est basée sur une description par entités (entity). Notre modèle hiérarchisé adoptant

également une structuration des données basée-entités, le passage de notre modèle hiérarchisé des données au formalisme EXPRESS-G de l'ISO 14649 est simplifié. Ainsi, on peut voir sur le diagramme de la Figure 85, une illustration de la proposition d'un modèle ISO 14649 à partir des données du modèle hiérarchisé. Associé au diagramme EXPRESS-G, les informations du nouveau modèle ISO 14649 doivent également être définies dans le langage EXPRESS. Le modèle EXPRESS de l'exemple de la Figure 85 est défini également ci-dessous.

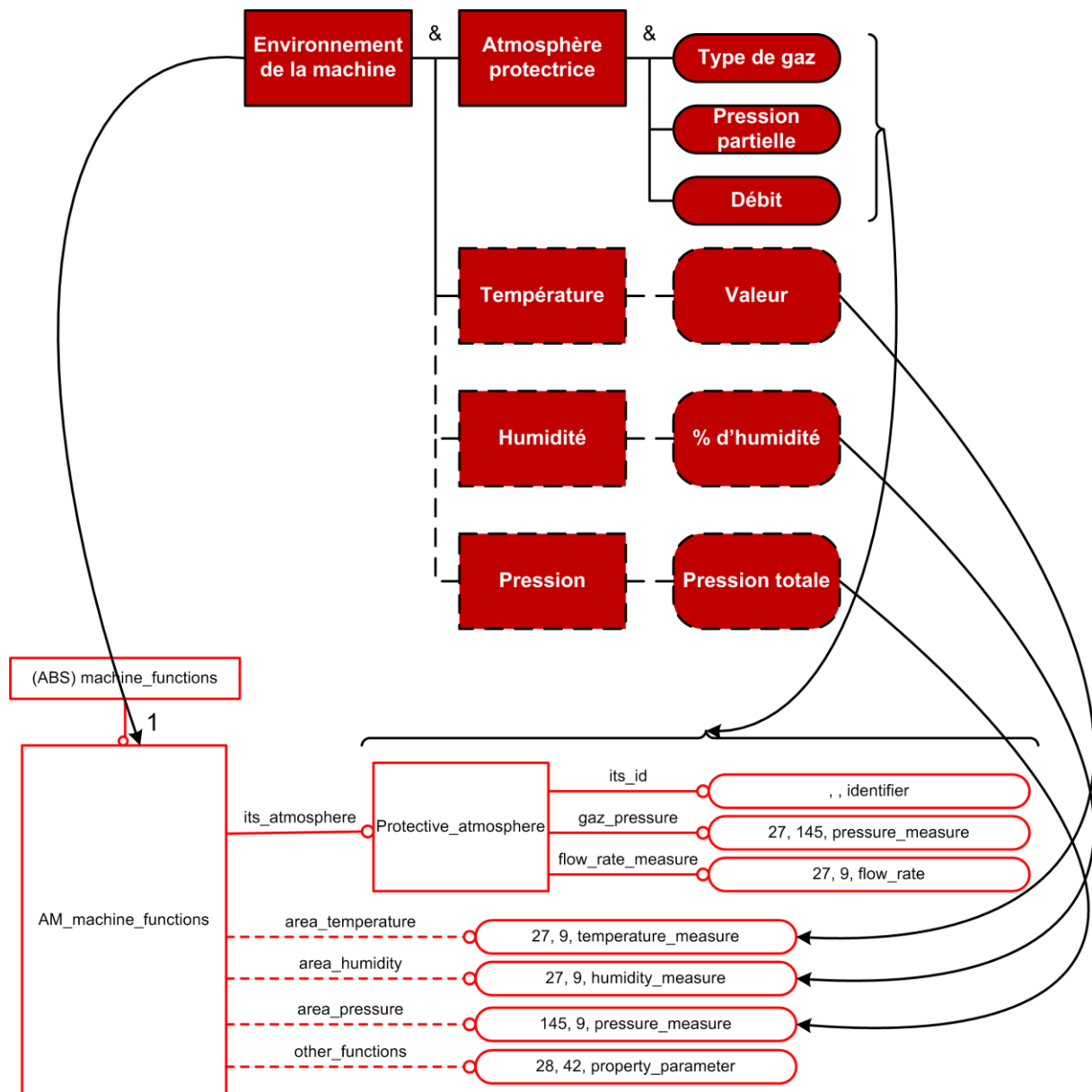


Figure 85 : Exemple de passage du modèle hiérarchisé au modèle EXPRESS-G

```
ENTITY AM_machine_functions
  SUBTYPE OF (machine_functions);
  its_atmosphere      protective_atmosphere
```

(* m0 *)


```

area_pressure:          OPTIONAL pressure_measure;
area_temperature:       OPTIONAL temperature_measure;
area_humidity:          OPTIONAL humidity_measure;
other_functions:        SET [0:?] OF property_parameter;
END_ENTITY;

ENTITY protective_atmosphere (* m0 *)
  its_id:                identifier;
  gaz_pressure:          OPTIONAL pressure_measure;
  flow_rate:             OPTIONAL flow_rate_measure;
END_ENTITY;

```

4.5 Données introduites dans la *part 10* de la norme ISO 14649

Sur la Figure 86 suivante, le plan de la *part 10* existante est donné ainsi que le lieu et place des nouvelles données concernant la fabrication additive. Ces nouvelles données introduites dans l'ISO 14649-10 sont détaillées dans la suite du paragraphe. Ces nouvelles données (en formalisme EXPRESS et EXPRESS -G) sont directement issues du modèle hiérarchisé mis en place dans le chapitre précédent. Toutes les données du modèle hiérarchisé ne sont pas traduites dans la *part 10* de l'ISO 14649, en effet les données spécifiques fabrication rapide sont réunies dans les *parts 17 et 171*.

Foreword

Introduction

1 Scope

2 Normative references

3 Terms and definitions ← Définition de la fabrication additive

4 General process data

4.1 Header and references

4.2 General types and definitions ← Définition des nouvelles unités utilisées en fabrication rapide

4.3 Where to start: project

4.4 Workpiece and manufacturing features ← Définition dans un nouveau paragraphe du AM_workpiece

4.5 Catalogue of manufacturing features

4.6 To make things happen

4.6.1 Executable

4.6.2 Workingstep ← Définition dans un nouveau paragraphe du AM_workingstep

4.6.3 NC function

4.6.4 Program structure

4.7 How to machine: operation

4.7.1 Operation ← Définition dans un nouveau paragraphe des AM_operation

4.7.2 Machining operation

4.8 Explicit toolpath definition

4.9 Rules

4.10 End of schema

Figure 86 : Plan de la *part 10* actuelle et intégration des nouvelles données fabrication additive

4.5.1 Nouveau modèle ISO 14649 unités de mesure nécessaires à la fabrication additive

Les procédés par ajout de matière utilisent des technologies différentes de l'usinage, ceci induit l'utilisation pour mesurer leurs paramètres caractéristiques (intensité du laser, température de l'enceinte...) de nouvelles unités de mesure. Il est donc nécessaire de définir quelles sont les unités de mesure nécessaires à la caractérisation de la fabrication additive et ensuite de les définir dans la norme ISO 14649-10. Ces nouveaux éléments sont définis en langage EXPRESS et sur le diagramme EXPRESS-G (en rouge) de la Figure 87 ci-dessous :

Mesure du débit:

A measure for flow.

```
TYPE flow_measure = REAL;
END_TYPE;
```

Mesure de l'intensité:

A measure for intensity.

```
TYPE intensity_measure = REAL;
END_TYPE;
```

Mesure de la température:

A measure for temperature.

```
TYPE temperature_measure = REAL;
END_TYPE;
```

Mesure de l'humidité:

A measure for humidity.

```
TYPE humidity_measure = REAL;
END_TYPE;
```

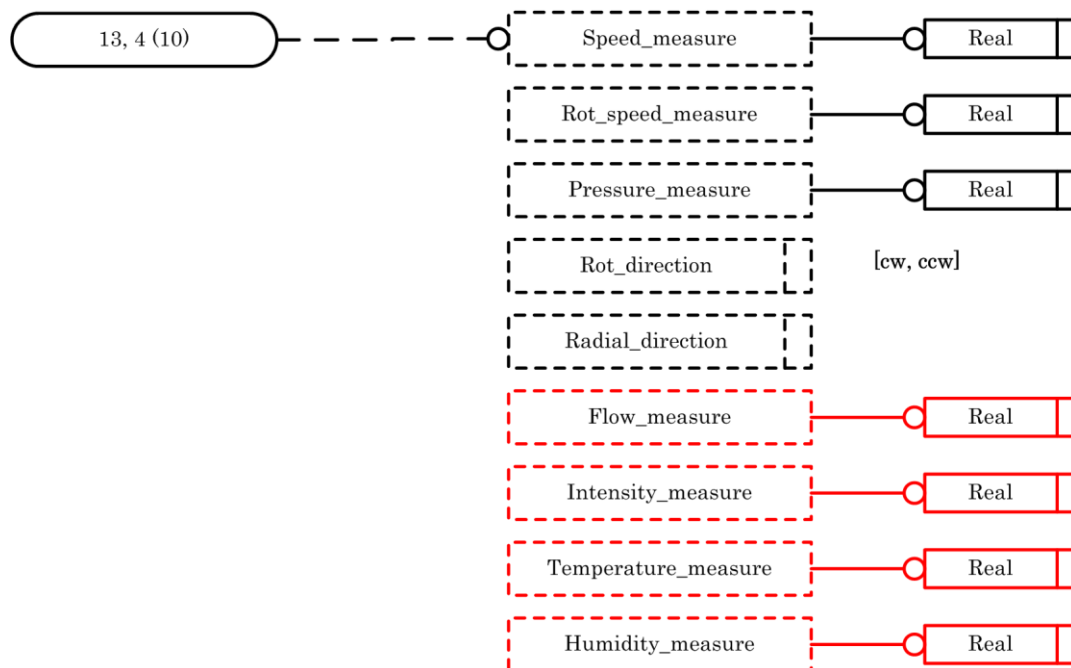


Figure 87 : Diagramme EXPRESS-G des nouvelles unités de mesure

4.5.2 Définition d'un projet de fabrication additive

Comme déjà mentionné lors de la mise en place du modèle hiérarchisé, la définition d'un projet de fabrication nécessite le renseignement des mêmes informations, que le projet soit un projet de fabrication par ajout ou enlèvement de matière. Cette partie de la norme est donc commune pour ces deux types de procédé. La traduction en données EXPRESS-G des informations concernant le projet du modèle hiérarchisé est développée sur la Figure 88. Les informations qui sont représentées sur ce diagramme sont issues du niveau 1 du modèle hiérarchisé des données que nous avons proposé.

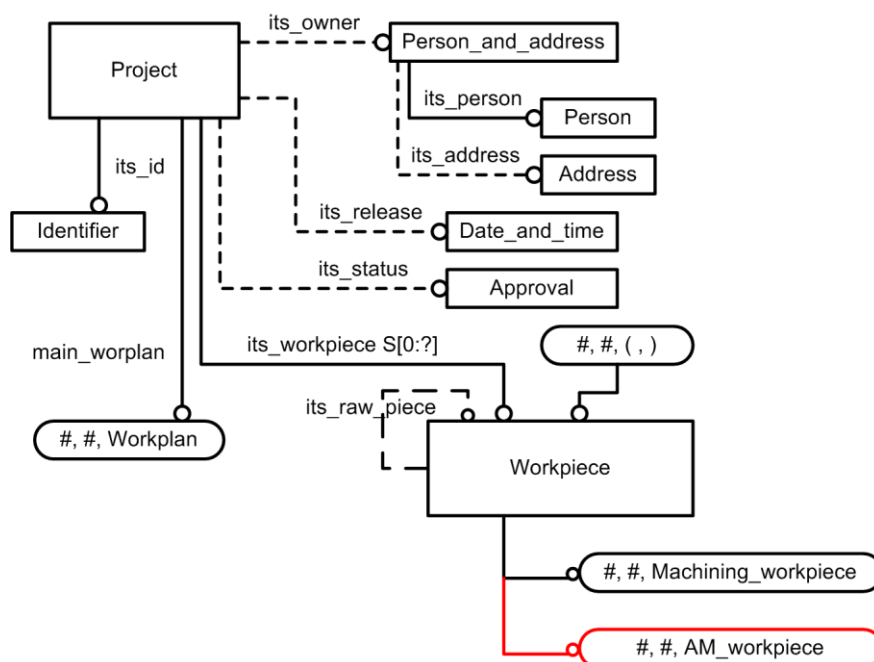


Figure 88 : Diagramme EXPRESS-G d'un projet de fabrication

4.5.3 Description actuelle de pièces fabriquées en usinage avec la norme STEP-NC : notion de Workpiece

La description des pièces dans la norme ISO 14649 est actuellement réalisée de la manière suivante : à partir d'un brut (Workpiece), les entités de fabrication sont soustraites de ce brut. Actuellement, dans la norme ISO 14649, 3 types de bruts sont disponibles : block (de type parallélépipédique) pour le fraisage, right_circular_cylinder (de type cylindre) pour le tournage et advanced_brep_shape_representation (de forme gauche) pour les bruts déjà préformés. Le workpiece ainsi défini pour l'usinage ne peut être composé que d'un seul matériau avec les propriétés mécaniques qui lui sont propres. A chacune de ces entités est associée une unique opération de fabrication, dans laquelle est définie la stratégie, l'outil utilisé, les paramètres de coupe... Ensuite les différentes opérations sont organisées en Workingstep et ces Workingsteps sont organisées dans le Workplan (gamme de fabrication).

Pour les procédés de fabrication par ajout de matière la manière de décrire les pièces est différente, nous allons donc faire une nouvelle proposition de description des pièces réalisées par ajout de matière.

4.5.4 Proposition d'un nouveau modèle pour les pièces par ajout de matière : AM_workpiece

Plusieurs points de divergences sont donc à souligner entre les procédés par ajout et par enlèvement de matière :

- Les pièces sont réalisées couche par couche sans enlèvement de matière.
- Les pièces de fabrication additive peuvent être réalisées avec plusieurs matériaux.
- Il peut exister des supports en fabrication additive.
- Des formes non-usinables peuvent être fabriquées par ajout de matière (canaux conformes...).

Nous allons proposer un nouveau modèle de description des pièces de fabrication additive avec l'idée de conserver le même style de description que pour les procédés par enlèvement de matière pour garder une cohérence au sein de la norme STEP-NC, à savoir :

- Une seule opération par entité.
- Réutiliser les entités présentes dans la norme STEP-NC usinage.

On propose donc de développer un modèle de description s'appuyant sur les entités de fabrication existante dans la norme ISO 14649 et de nouvelles entités de fabrication rapide qui permette :

- D'avoir un modèle dans lequel une opération est associée à un seul ensemble (1).
- De s'appuyer sur les entités d'usinage existantes (2).
- De décrire de nouvelles entités de fabrication rapide (3).
- De décrire des supports (4).
- D'avoir des pièces avec plusieurs matériaux (5).
- De pouvoir définir des supports préformés (6).
- D'avoir plusieurs directions de fabrication (7).

Pour répondre aux objectifs et conditions définis précédemment, on propose d'introduire des sub_am_workpieces, auxquels on associe une opération de fabrication rapide (avec la même source d'énergie, les mêmes réglages de la machine, la même stratégie...). Si la stratégie de fabrication reste la même tout au long de la fabrication d'un sub_am_workpiece, les paramètres liés à la source d'énergie peuvent évoluer en fonction de la température ou d'autres paramètres. Cela répond donc bien à l'objectif (1) défini précédemment.

On a donc le AM_Workpiece général de description de la pièce, puis un sous ensemble de sub_am_workpieces définissant des parties distinctes de la pièce à fabriquer. Les informations qui sont définies dans le AM_workpiece sont des informations issues des niveaux 2 (description de la pièce) et 4 (modèle produit pour la fabrication additive). La définition du AM_workpiece dans la norme se fera de la manière suivante :

```
ENTITY AM_workpiece;                                (* m1 *)
  its_id: identifier;
  global_tolerance: OPTIONAL shape_tolerance;
  its_rawpiece: OPTIONAL AM_workpiece;
  its_geometry: OPTIONAL advanced_brep_shape_representation;
  clamping_positions: SET [0:?] OF cartesian_point;
END_ENTITY;
```

Chacun de ces sub_am_workpieces est associé à un bounding_geometry_select, de type block, cylinder, sphere, advanced_brep_shape_representation... Desquels on enlève les entités d'usinage manufacturing_feature et les nouvelles entités de fabrication additive additive_manufacturing_features. Les objectifs (2) et (3) sont donc satisfaits par l'utilisation de notre modèle. Ces entités de fabrication pourront être de trois types : vides, pleines ou supports (pour les entités pleines ou supports des structures type nid d'abeille pourront être définies au niveau de l'AM_structure), ce qui répond à l'objectif (4) défini auparavant. De plus chacun de ces sub_am_workpiece peut être d'un matériau différent (certaines entités pourront aussi être réalisées en multi-matériaux dont le gradient est défini au niveau de l'AM_structure), ce qui répond bien à l'objectif (5) de notre nouveau modèle de description des pièces réalisées par ajout de matière.

D'autre part un changement est à observer au niveau de la description des sub_am_workpiece, par rapport à la définition des pièces d'usinage. En effet, les sub_am_workpiece peuvent être de deux types : déjà fabriqués (servant comme support préformé) en usinage, mécano-soudé, formé incrémentalement... ou à fabriquer. Pour les sub_am_workpiece à fabriquer, il leur est associé une direction de fabrication, un type de tranchage et une valeur de tranchage, des paramètres de fabrication et une source d'énergie (le même genre d'information que pour le workpiece d'usinage, mais ici en fabrication additive). Ces derniers points réalisés par notre nouveau modèle, basé sur des sub_am_workpiece, satisfont bien les points (6) et (7) définis comme objectifs de notre nouveau modèle.

De plus, il ne peut y avoir qu'une seule entité bounding_geometry_select, par sub_am_workpiece. La définition des sub_am_workpiece dans la norme se fait de la manière suivante :

```
ENTITY sub_am_workpiece;                            (* m1 *)
  its_struture: AM_structure;
  its_operation AM_operation;
  its_material: OPTIONAL material;
  global_tolerance: OPTIONAL shape_tolerance;
  its_rawpiece: OPTIONAL am_sub_workpiece;
  its_geometry: OPTIONAL advanced_brep_shape_representation;
  its_bounding_geometry: OPTIONAL bounding_geometry_select;
  clamping_positions: SET [0:?] OF cartesian_point;
END_ENTITY;
```

Un exemple de décomposition avec notre nouveau modèle est réalisé sur une pièce_test (la même que celle présentée au chapitre précédent), le modèle est présenté sur la Figure 89.

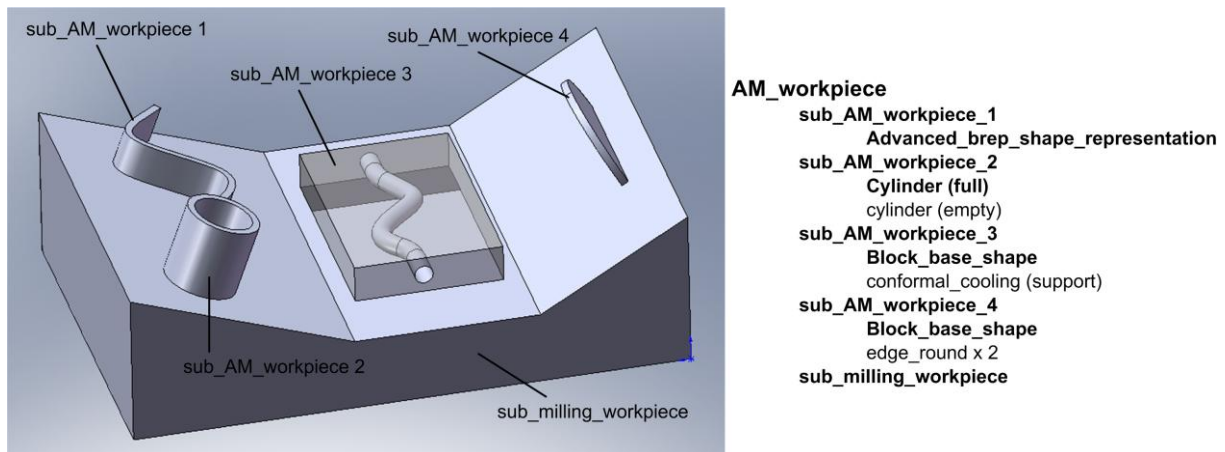


Figure 89 : Exemple d'une pièce de fabrication additive décomposée en STEP-NC_AM

En plus d'une nouvelle manière de décrire les pièces réalisées par ajout de matière, de nouvelles entités spécifiques fabrication additive sont nécessaires à leur description. Ces nouvelles entités doivent donc être renseignées au niveau de la *part 10*. Après échanges avec des membres de l'ISO, nous avons proposé de créer une sous-partie (voir Figure 90) dans *manufacturing_feature*, que l'on nomme *technology_feature*. Cette sous-partie pourra accueillir toutes les nouvelles entités nécessaires pour de nouveaux procédés de fabrication ajoutés dans la norme ISO 14649, dont les procédés par ajout de matière. Les entités détaillées : *AM_features* sont définies dans la *part 17* de l'ISO 14649 qui est une nouvelle partie spécifique à la fabrication additive.

```
ENTITY manufacturing_feature (* m1 *)
  ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF (region, two5D_manufacturing_feature,
transition_feature, technology_feature));
```

Dans la norme cette nouvelle sous-partie *technology_feature* est définie comme suivant :

```
technology_feature
This is the supertype for all technology specific features not covered by
the other feature types. An example of the use of technology features is
for additive manufacturing technologies which different needs from material
removal processes.
ENTITY technology_feature (* m0 *)
  ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF (additive_manufacturing_feature));
  SUBTYPE OF (manufacturing_feature);
END_ENTITY;
```

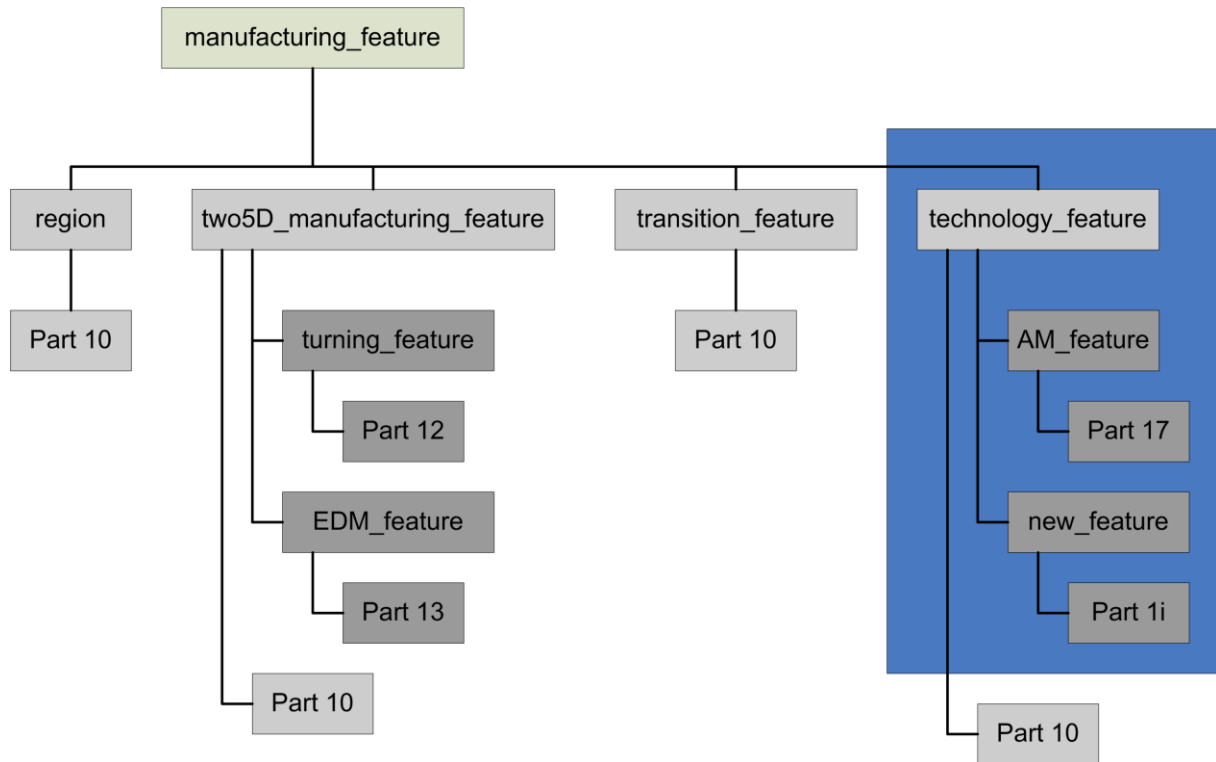


Figure 90 : Nouvelle organisation des entités de fabrication

Toutes les données décrites précédemment sur la définition du workpiece et la définition du projet de fabrication additive se retrouvent sur le diagramme EXPRESS-G suivant (Figure 91). Ces informations sont directement issues du modèle hiérarchisé à partir des étapes 1 et 2 de ce modèle.

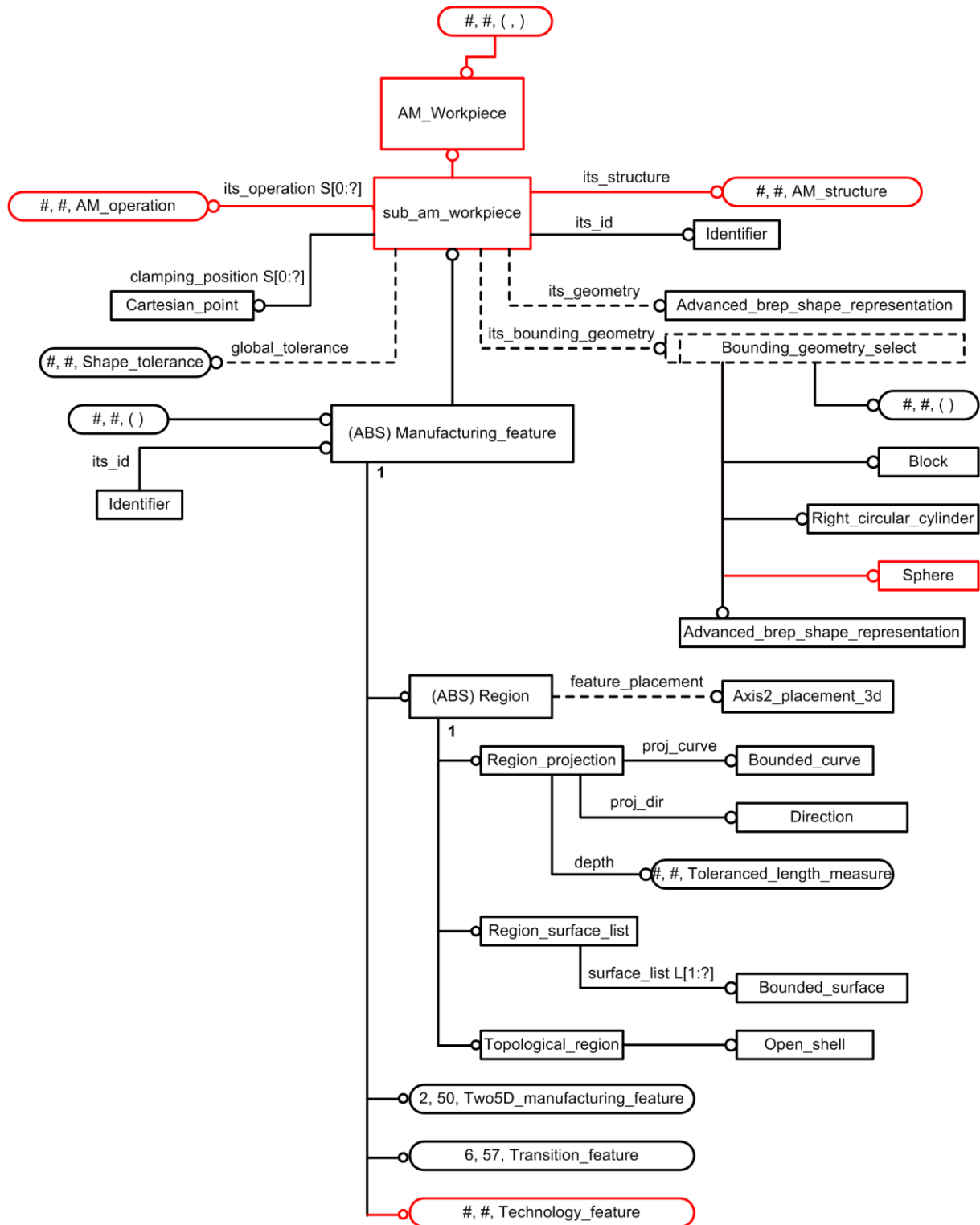


Figure 91 : Diagramme EXPRESS-G de description du workpiece

4.5.5 Nouveau modèle ISO 14649 AM_Workingstep

Le workingstep représente les blocs essentiels d'un programme STEP-NC. Ils peuvent être de deux types : soit des actions indépendantes tels que un mouvement rapide, une opération de mesure ou un workingstep de fabrication qui donne des informations sur la technologie de fabrication utilisée : soit en usinage (machining_workingstep : fraisage,

turning_workingstep : tournage...), soit en fabrication additive (AM_workingstep). Pour la fabrication additive, les informations qui composent ce nouveau modèle sont issues des niveaux 4 (préparation de la fabrication) et 6 (fabrication) de notre modèle hiérarchisé des données. Le AM_workingstep est donc une sous-partie du workingstep.

```
ENTITY workingstep (* m0 *)
  ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF (machining_workingstep, am_workingstep,
    rapid_movement, touch_probing))
  SUBTYPE OF (executable);
  its_secplane: elementary_surface;
END_ENTITY;
```

Le AM_workingstep est associé à un sub_am_workpiece. Il permet de coordonner tous les éléments permettant de réaliser le sub_am_workpiece concerné : paramètres de fabrication définis dans AM_operation, paramètres de l'enceinte définis dans am_machine_function. Il est aussi caractérisé par l'utilisation d'une seule source d'énergie de fabrication (pas de changement possible).

```
ENTITY AM_workingstep (* m0 *)
  SUBTYPE OF (workingstep);
  its_sub_am_workpiece: sub_am_workpiece;
  its_operation: AM_operation;
  its_effect: OPTIONAL in_process_geometry;
END_ENTITY;
```

La définition générale de l'exécutable, des fonctions de la commande numérique et de la structure du programme sont les mêmes pour l'usinage et la fabrication additive (informations issues du niveau 5 de notre modèle hiérarchisé). On peut voir l'organisation générale de toutes ces parties sur le diagramme EXPRESS-G de la Figure 92 ci-dessous. De nouvelles fonctions spécifiques aux commandes numériques des machines de fabrication additive pourront être ajoutées dans notre modèle si nécessaire.

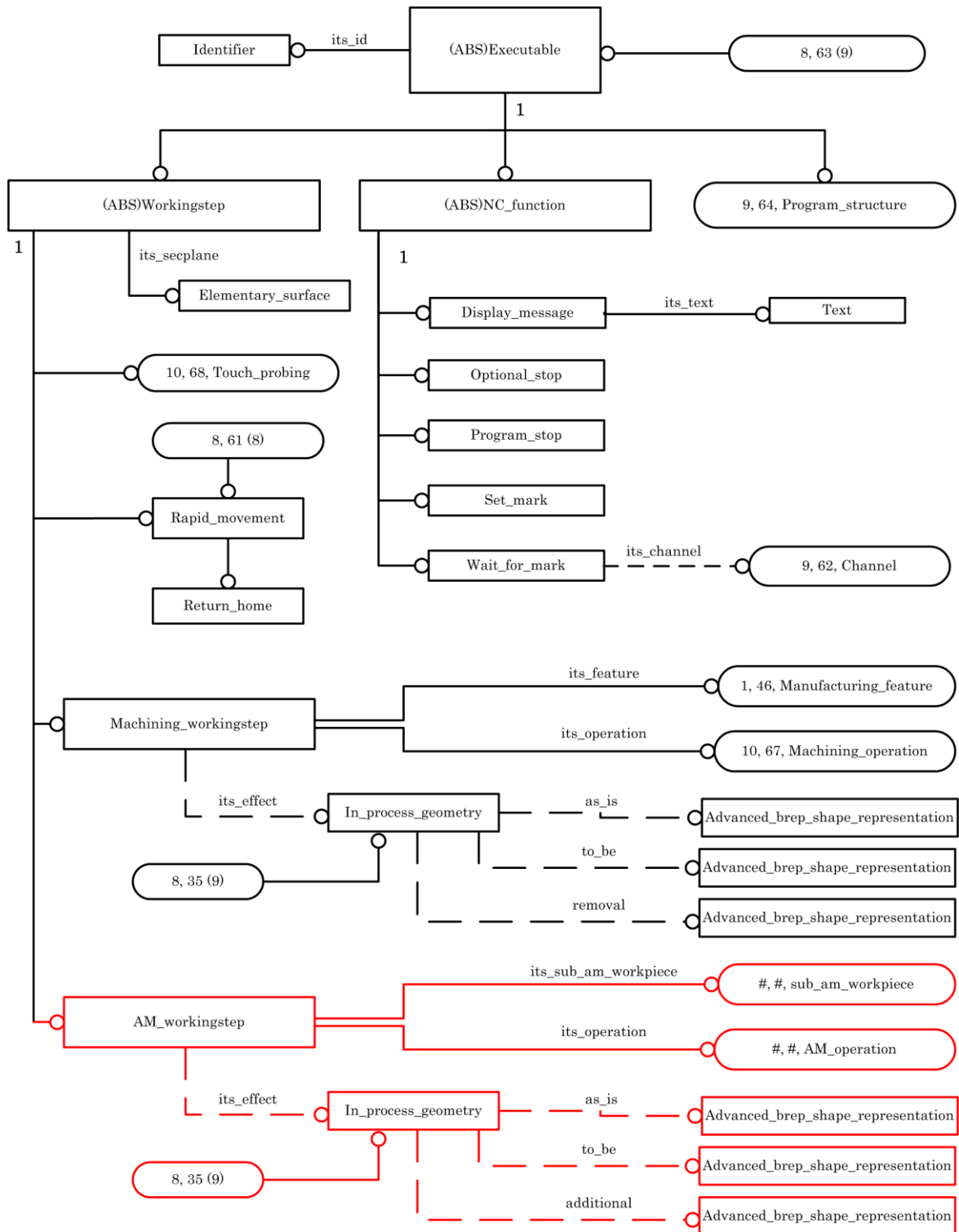


Figure 92 : Diagramme EXPRESS-G de description des workingstep

4.5.6 Nouveau modèle ISO 14649 pour la programmation en fabrication additive

Le niveau 5 de notre modèle hiérarchisé concerne le programme, qui est défini pour le DCN de la machine de fabrication additive, et qui regroupe les informations pour la

fabrication. Cette partie est déjà développée pour les procédés de fabrication par enlèvement de matière au niveau de la *part 10* de l'ISO 14649. Ainsi, les modèles de description de la structure du programme et des exécutables sont déjà développés. Nous nous appuyerons donc sur ces modèles pour la fabrication additive. De nouvelles fonctions spécifiques pour la fabrication additive pourront être ajoutées par la suite.

4.6 Données introduites dans la *part 17* de la norme ISO 14649

La *part 17* de la norme ISO 14649 est une nouvelle partie qui regroupe toutes les informations spécifiques à la fabrication additive. L'introduction de cette partie dans l'ISO 14649 a été décidée par le comité ISO TC184/SC1. Notre équipe de recherche est chargée de la proposition d'un nouveau modèle pour la fabrication additive et contribue donc à la rédaction de cette *part 17*.

4.6.1 Nouvelle définition des entités de fabrication additive AM_features

Les entités spécifiques à la fabrication additive sont définies dans la *part 17* de l'ISO 14649. Cette nouvelle entity, *additive_manufacturing_feature*, est une sous-partie de l'entity *technology_feature*, déjà présentée dans ce chapitre. Toutes les nouvelles entités de fabrication pour la fabrication additive seront donc définies comme étant des sous-entités de *additive_manufacturing_feature*. Ainsi, nous pouvons déjà définir les canaux conformes (*conformal_cooling*) comme faisant partie de ces entités. Les formalismes EXPRESS et EXPRESS-G (Figure 93) de ces nouvelles entités de fabrication additive sont définis ci-dessous.

```
ENTITY additive_manufacturing_feature (* m0 *)
  ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF (conformal_cooling_feature));
  SUBTYPE OF (technology_feature);
END_ENTITY;
```

Pour les entités canaux conformes (*conformal_cooling*), nous proposons d'introduire trois types différents d'entités : les canaux conformes plans (*plane_conformal_cooling*), les canaux conformes hélicoïdaux (*helical_conformal_cooling*) et les canaux conformes 3D (*freeform_conformal_cooling*). Le formalisme EXPRESS de ces nouvelles entités est défini ci-dessous.

```
ENTITY conformal_cooling (* m0 *)
  ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF (plane_conformal_cooling,
    helical_conformal_cooling, freeform_conformal_cooling));
  SUBTYPE OF (additive_manufacturing_feature);
END_ENTITY;
```

Dans ce manuscrit, nous n'allons pas présenter la définition STEP-NC de toutes les nouvelles entités de fabrication additive que nous proposons. Ci-dessous, nous présentons la définition des canaux conformes plans (voir formalisme EXPRESS), qui sont définis, à partir de leur profil et du parcours du canal conforme (Figure 94).

```

ENTITY plane_conformal_cooling
  SUBTYPE OF (conformal_cooling);
    course_of_travel      travel_path;
    swept_shape           profile;
END_ENTITY;

```

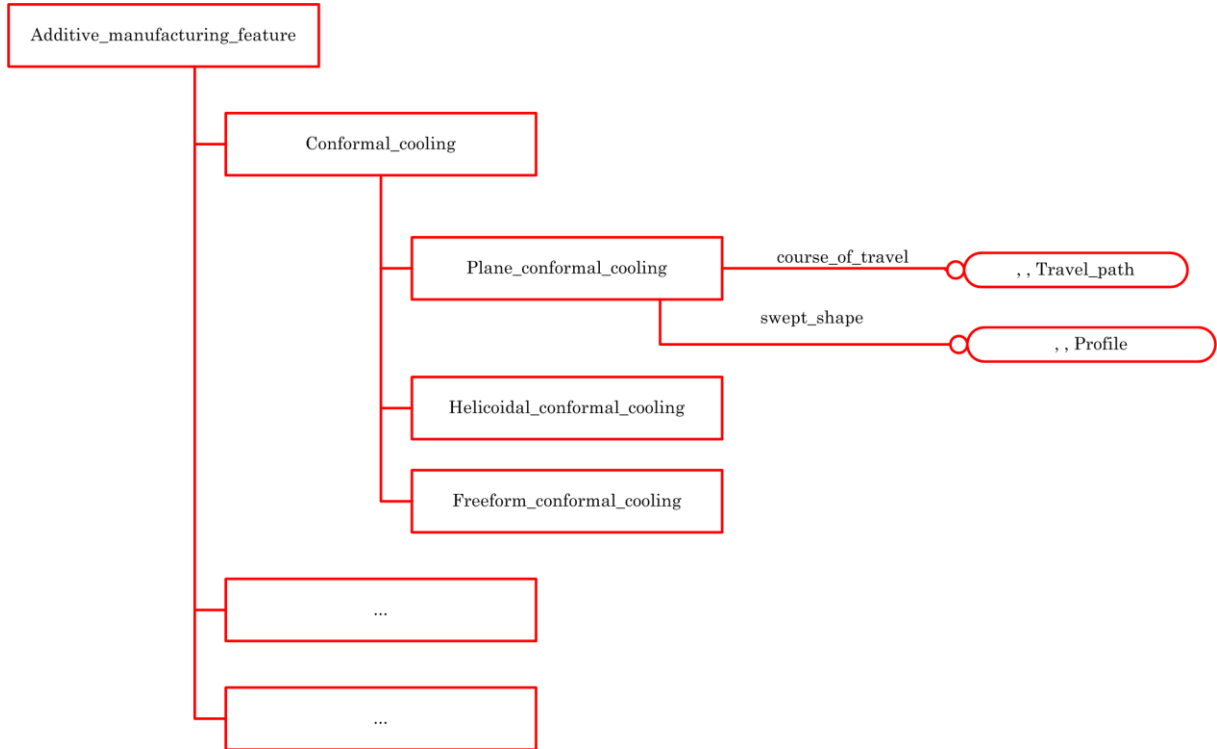


Figure 93 : Diagramme EXPRESS-G des entités de fabrication additive

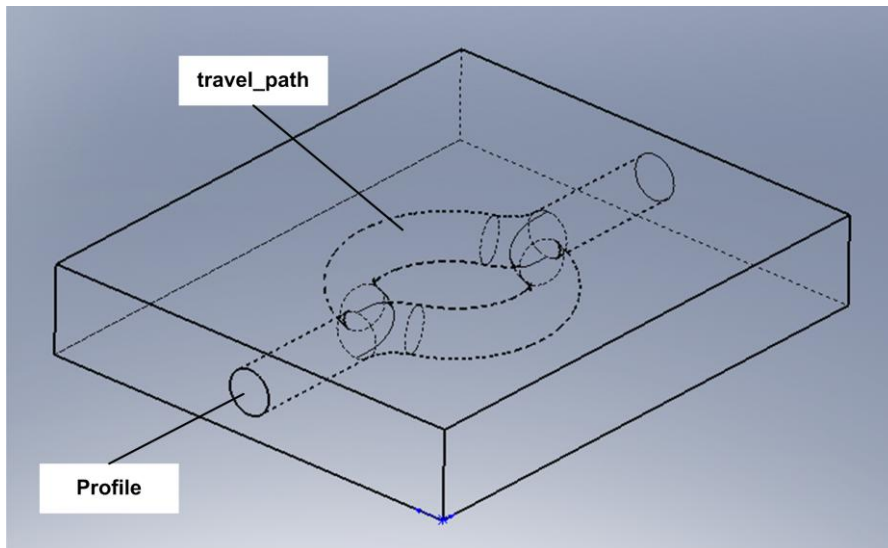


Figure 94 : Représentation de l'entité de fabrication plane_conformal_cooling

4.6.2 Nouvelle définition des opérations de fabrication additive AM_operation

Dans la *part 17* de l'ISO 14649 spécifique à la fabrication additive, il est nécessaire de définir les nouvelles opérations spécifiques à la fabrication additive. Tout comme la définition de *machining_operation* est une sous partie de l'entity *operation* dans la norme STEP-NC, *AM_operation* est une sous-partie de l'entity *operation*. Ces informations sont issues du niveau 4 de notre modèle hiérarchisé qui concerne le réglage des paramètres de fabrication additive. La définition du modèle STEP-NC est réalisée ci-dessous avec le modèle EXPRESS et le diagramme EXPRESS-G de la Figure 95.

```
ENTITY OPERATION (* m0 *)
  ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF (machining_operation, AM_operation,
    rapid_movement, touch_probing));
  its_toolpath:      OPTIONAL toolpath_list;
  its_tool_direction:  OPTIONAL tool_direction;
END_ENTITY;
```

Pour chaque opération de fabrication additive, il est nécessaire de définir : son nom, un plan de retrait (en option), un point de départ (en option), la source d'énergie qui va réaliser l'opération, la technologie utilisée et les paramètres de l'environnement machine. Dans la norme la définition des opérations de fabrication additive (*AM_operation*) apparaît comme telle :

```
ENTITY AM_operation (* m0 *)
  ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF (AM_layer_by_layer_operation,
    AM_freeform_operation));
  SUBTYPE OF (OPERATION);
  its_id:      identifier;
  retract_plane:  OPTIONAL length_measure;
  start_point:   OPTIONAL cartesian_point;
  its_tool:      AM_tool;
  its_technology:  AM_technology;
  its_machine_functions:  AM_machine_functions;
END_ENTITY;
```

retract_plan : Le plan de retrait est le plan à partir duquel la vitesse d'avance de la source d'énergie n'est plus la vitesse rapide, mais la vitesse d'approche, de retrait ou de travail. Ce n'est pas un plan de sécurité qui est défini auparavant dans la norme.

its_am_tool : C'est la source d'énergie qui est définie pour le workingstep en cours d'exécution. La définition des *AM_tool* se fait dans la *part* spécifique de l'ISO 14649, à savoir la *part 171*.

its_technology : ce sont les paramètres liés à la réalisation de l'opération. Les paramètres liés à la définition des opérations de fabrication additive sont définis dans la sous-partie *am_technology* qui est spécifiée dans la *part 17* de l'ISO 14649. On y retrouve par exemple l'intensité du laser, la puissance du laser...

its_machine_function : ce sont les paramètres de réglage de l'enceinte de fabrication. Les paramètres liés au réglage de la chambre de fabrication lors des opérations de fabrication additive sont définis dans la sous-partie *am_machine_function* qui est spécifiée

dans la *part 17* de l'ISO 14649. On y retrouve par exemple la température de l'enceinte, la pression de l'enceinte...

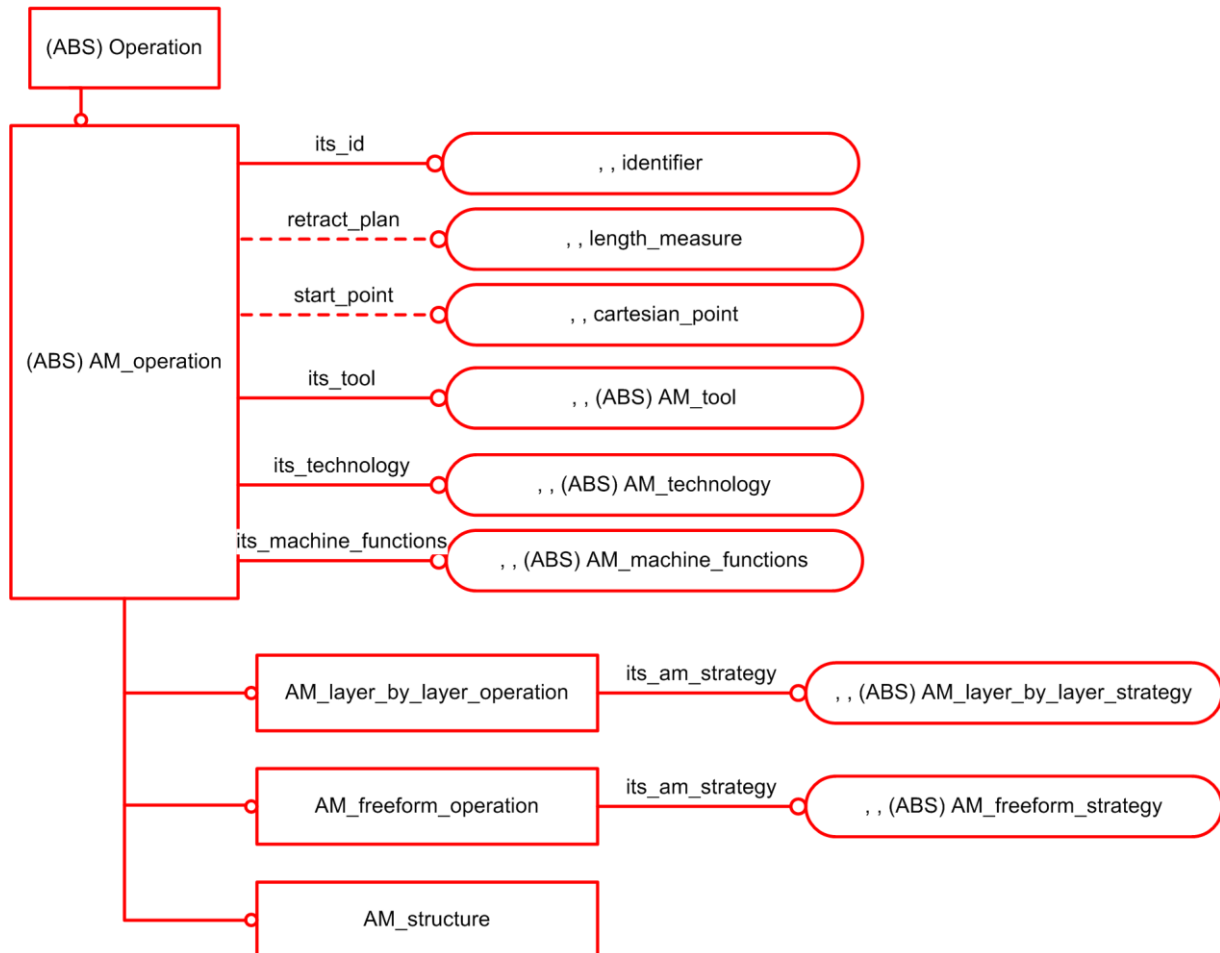


Figure 95 : Diagramme EXPRESS-G de description des AM_operation

4.6.3 Nouvelle définition des technologies de fabrication additive AM_technology

Il est nécessaire de définir les technologies de fabrication par ajout de matière dans la norme ISO 14649 *part 17*. Ces informations sont issues du niveau 3 du modèle hiérarchisé (technologie de fabrication additive). Notre modèle propose le choix entre trois types de technologies de transformation de matière : poudre, liquide ou solide. Pour chacune de ces technologies, les paramètres liés à la fabrication doivent être définis (vitesse de la source d'énergie, intensité de la source d'énergie, puissance de la source d'énergie). Le nouveau modèle ISO 14649 est décrit en suivant avec le langage EXPRESS et le diagramme EXPRESS-G de la Figure 96.

```

ENTITY AM_technology (* m0 *)
  ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF(powder_technology, liquid_technology,
    solid_technology));
  SUBTYPE OF (technology);
END_ENTITY;
  
```

```

ENTITY powder_technology (* m0 *)
  SUBTYPE OF (AM_technology);
  tool_velocity:          OPTIONAL tool_velocity_measure;
  tool_intensity:         OPTIONAL tool_intensity_measure;
  tool_power:             OPTIONAL tool_power_measure;
END_ENTITY;

ENTITY liquid_technology (* m0 *)
  SUBTYPE OF (AM_technology);
  tool_velocity:          OPTIONAL tool_velocity_measure;
  tool_intensity:         OPTIONAL tool_intensity_measure;
  tool_power:             OPTIONAL tool_power_measure;
END_ENTITY;

ENTITY solid_technology (* m0 *)
  SUBTYPE OF (AM_technology);
  tool_velocity:          OPTIONAL tool_velocity_measure;
  tool_intensity:         OPTIONAL tool_intensity_measure;
  tool_power:             OPTIONAL tool_power_measure;
END_ENTITY;

```

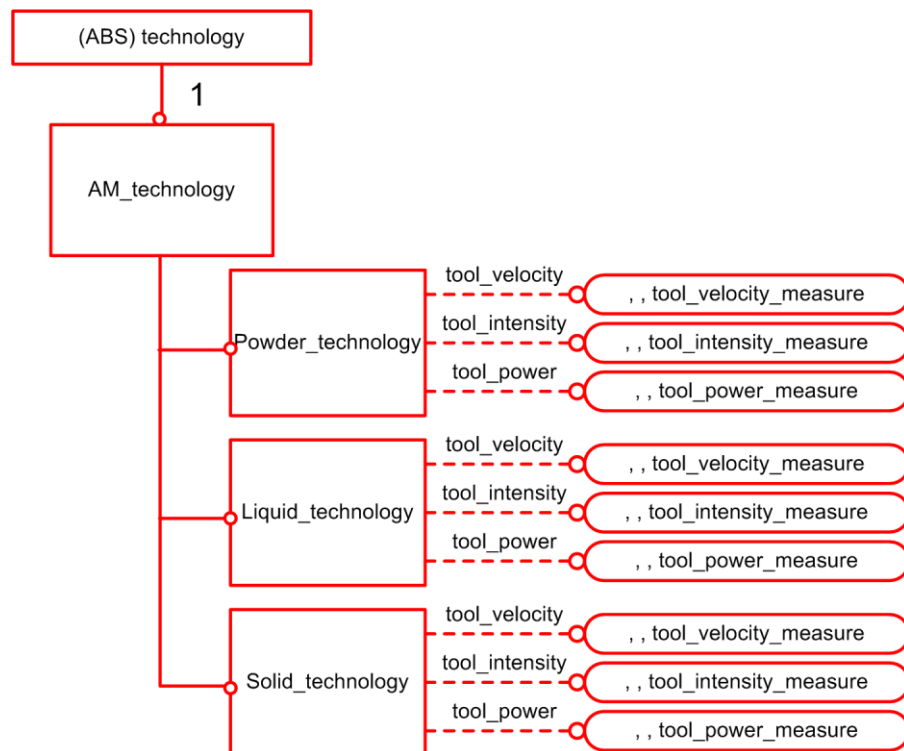


Figure 96 : Diagramme EXPRESS-G de description des AM_technology

4.6.4 Nouvelle définition des paramètres de l'enceinte de fabrication additive AM_machine_function

Les paramètres de réglage de la chambre de fabrication des machines de fabrication additive doivent être définis dans la norme ISO 14649-17. Ces paramètres sont spécifiques à la fabrication additive et sont donc définis dans la *part 17* de la norme ISO 14649. Ces informations sont issues du niveau 4 de notre modèle hiérarchisé des données (environnement de la machine). Le nouveau modèle ISO 14649 est décrit en suivant avec le langage EXPRESS et le diagramme EXPRESS-G de la Figure 97.

```

ENTITY AM_machine_functions                                     (* m0 *)
  SUBTYPE OF (machine_functions);
  its_atmosphere      protective_atmosphere
  area_pressure:      OPTIONAL pressure_measure;
  area_temperature:   OPTIONAL temperature_measure;
  area_humidity:      OPTIONAL humidity_measure;
  other_function:     OPTIONAL property_parameter;
END_ENTITY;

ENTITY protective_atmosphere                                  (* m0 *)
  its_id:             identifier;
  gaz_pressure:       pressure_measure;
  flow_rate:          flow_rate_measure;
END_ENTITY;

```

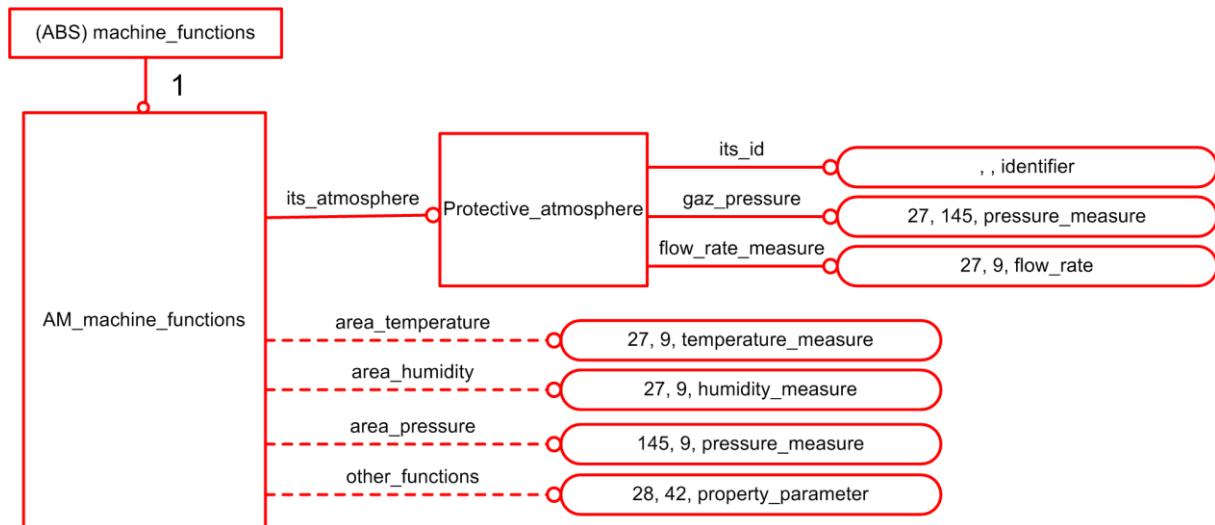


Figure 97 : Diagramme EXPRESS-G de description des AM_machine_functions

4.6.5 Nouvelle définition des stratégies de fabrication additive AM_strategy

Pour la fabrication additive, il est aussi nécessaire de définir des stratégies spécifiques de fabrication que nous intégrons dans la *part 17*. Pour l'instant ce modèle n'est pas exhaustif au niveau des stratégies et de nouvelles stratégies pourront être intégrées à notre modèle (nouvelles entités). Les informations qui sont données dans cette partie sont issues du niveau 4 de notre modèle hiérarchisé (stratégies et trajectoires de fabrication additive). Le modèle EXPRESS et le diagramme EXPRESS-G (voir Figure 98) des stratégies de fabrication additive sont décrits ci-dessous.

Pour l'instant, nous avons introduit trois grands types de stratégie de fabrication additive :

- Les stratégies planes (AM_layer_by_layer_strategy), avec plusieurs trajectoires possibles (unidirectionnelles, bidirectionnelles, ...). Pour toutes ces stratégies, il convient d'indiquer la hauteur de couche (thickness). Elles sont déjà définies pour l'usinage et pourront être adaptées à la fabrication additive.
- Les stratégies 5 axes (AM_freeform_strategy). Les différentes trajectoires possibles au niveau de ces stratégies n'ont pas encore été développées.

- Les stratégies d'approche et de retrait (AM_approach_retract_strategy). Les différentes trajectoires possibles au niveau de ces stratégies n'ont pas encore été développées.

```

ENTITY AM_layer_by_layer_strategy (* m0 *)
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF(explicit, unidirectional, bidirectional);
thickness: length_measure;
END_ENTITY;

ENTITY unidirectional (* m0 *)
SUBTYPE OF (layer_by_layer_strategy);
its_direction: direction;
its_pattern: pattern;
END_ENTITY;

ENTITY bidirectional (* m0 *)
SUBTYPE OF (layer_by_layer_strategy);
its_direction: direction;
its_pattern: pattern;
END_ENTITY;

ENTITY explicit (* m0 *)
SUBTYPE OF (layer_by_layer_strategy);
END_ENTITY;

ENTITY AM_freeform_strategy;

ENTITY AM_approach_retract_strategy;

```

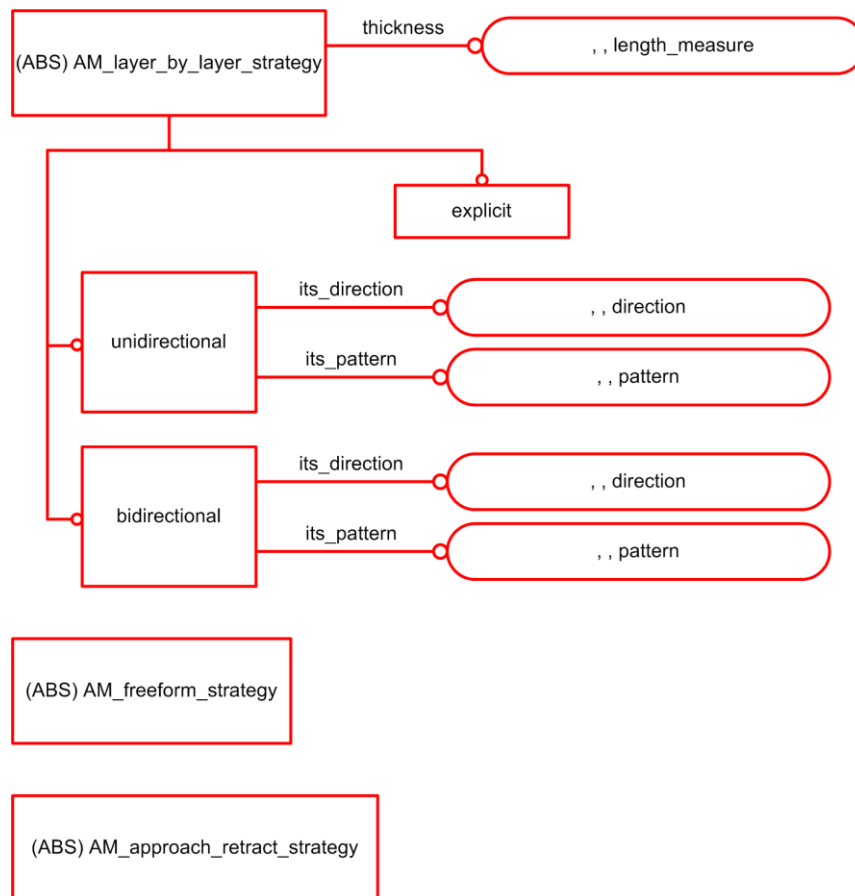


Figure 98 : Diagramme EXPRESS-G de description des AM_strategy

4.6.6 Nouvelle définition de la structure des pièces de fabrication additive AM_structure

L'une des particularités des pièces réalisées en fabrication additive par rapport aux pièces usinées, est la définition de la structure de ces pièces. En effet, leur structure n'est pas nécessairement homogène : motifs au niveau du corps de la pièce, présence de supports ou de surface d'accroche. Il est donc important de définir le nouveau modèle de la structure de ces pièces dans la *part 17* de l'ISO 14649. Les informations qui vont composer ce modèle sont issues du niveau 4 du modèle hiérarchisé des données de fabrication additive (structure de la pièce). Le modèle EXPRESS et le diagramme EXPRESS-G associé (Figure 99) sont définis ci-dessous.

```

ENTITY AM_structure (* m0 *)
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF(part_structure, surface_beaming_structure,
    support_structure));
END_ENTITY;

ENTITY part_structure (* m0 *)
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF(skin_construction, core_construction));
SUBTYPE OF (AM_structure);
END_ENTITY;

ENTITY surface_beaming_structure (* m0 *)
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF(manufactured_surface_beaming,
    tool_surface_beaming));
SUBTYPE OF (AM_structure);
END_ENTITY;

ENTITY support_structure (* m0 *)
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF(internal_support, external_support));
SUBTYPE OF (AM_structure);
END_ENTITY;

ENTITY skin_construction (* m0 *)
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF(full, honeycomb, chess));
SUBTYPE OF (part_structure);
Its_material OPTIONAL material;
END_ENTITY;

ENTITY core_construction (* m0 *)
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF(full, honeycomb, chess));
SUBTYPE OF (part_structure);
Its_material OPTIONAL material;
END_ENTITY;

ENTITY manufactured_surface_beaming (* m0 *)
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF(full, honeycomb, chess));
SUBTYPE OF (surface_beaming_structure);
Its_material OPTIONAL material;
END_ENTITY;

ENTITY tool_surface_beaming (* m0 *)
SUBTYPE OF (surface_beaming_structure);
Its_material OPTIONAL material;
END_ENTITY;

```

```
ENTITY internal_support (* m0 *)
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF(full, honeycomb, chess));
SUBTYPE OF (support_structure);
Its_material OPTIONAL material;
END_ENTITY;
```

```
ENTITY external_support (* m0 *)
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF(manufactured_external_support,
    tool_external_support));
SUBTYPE OF (support_structure);
END_ENTITY;
```

```
ENTITY manufactured_external_support (* m0 *)
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF(full, honeycomb, chess));
SUBTYPE OF (external_support);
Its_material OPTIONAL material;
END_ENTITY;
```

```
ENTITY tool_external_support (* m0 *)
SUBTYPE OF (external_support);
Its_material OPTIONAL material;
END_ENTITY;
```

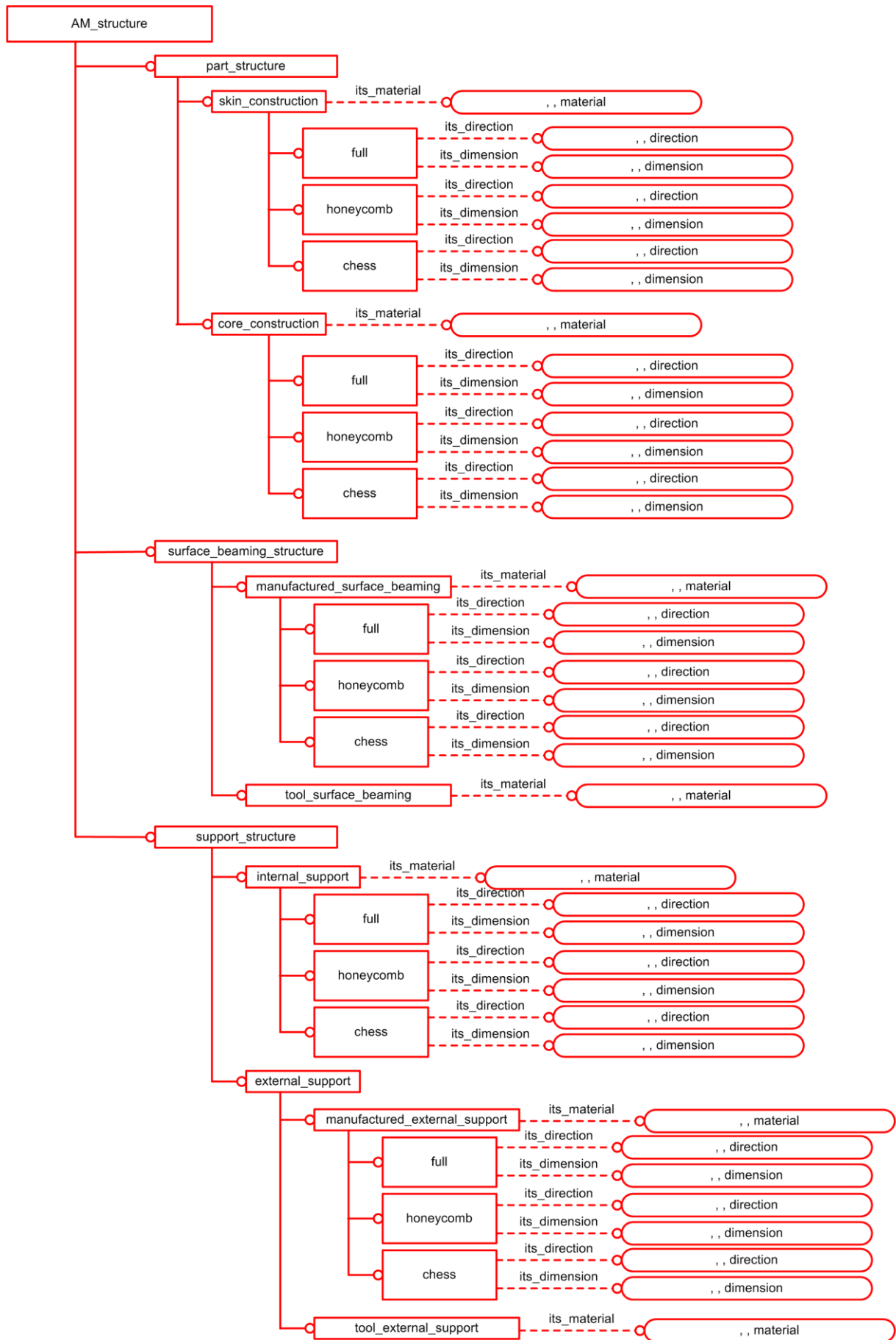


Figure 99 : Diagramme EXPRESS-G de description des AM_structure

4.7 Données introduites dans la *part 171* de la norme ISO 14649

La *part 171* de la norme ISO 14649 est une nouvelle partie qui regroupe toutes les informations spécifiques aux sources d'énergie de fabrication additive. Cette partie de la norme vient en complément de la *part 17* que nous avons présentée précédemment.

Les informations qui composent le modèle de description des outils de fabrication additive sont issues des niveaux 3 (technologie de la machine) et 4 (outils de fabrication additive). Le modèle ISO 14649 de description des sources d'énergie de fabrication additive est donné en EXPRESS et sur les diagrammes EXPRESS-G (Figure 100 et Figure 101) ci-dessous.

```
ENTITY AM_tool (* m0 *)
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF(AM_tool_body, AM_transfert_tool_
  AM_transformation_tool));
SUBTYPE OF (tool);
END_ENTITY;
```

```
ENTITY AM_tool (* m0 *)
SUBTYPE OF (AM_tool);
nozzle_diameter: length_measure;
its_material: material;
powder_diameter: length_measure;
matter_flow: length_measure;
protective_gaz: length_measure;
scraper_velocity: length_measure;
END_ENTITY;
```

```
ENTITY AM_tool (* m0 *)
SUBTYPE OF (AM_tool);
its_technology: technology;
END_ENTITY;
```

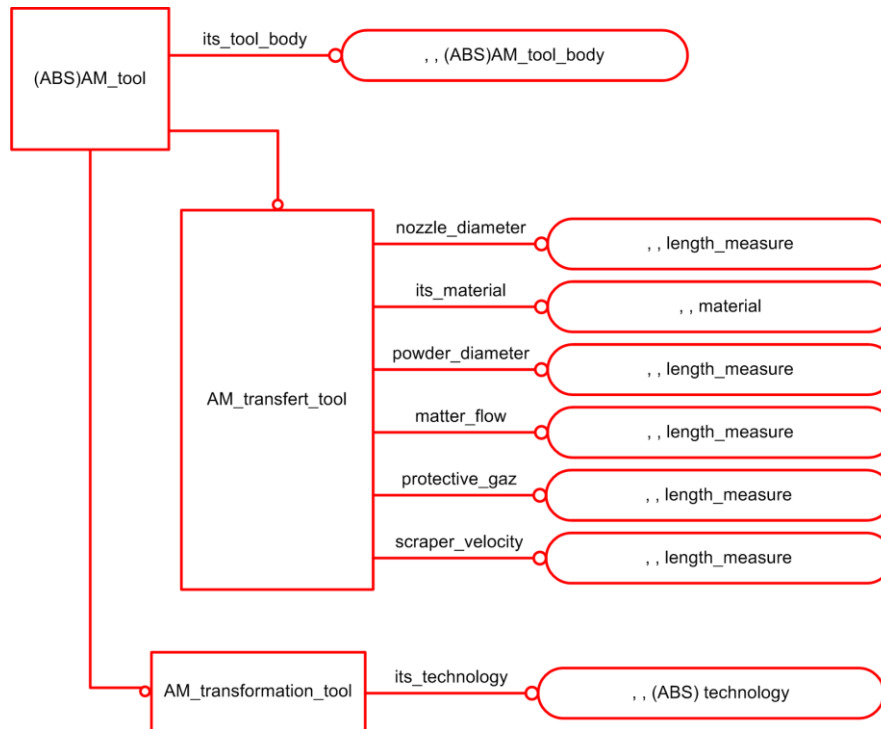


Figure 100 : Diagramme EXPRESS-G de description des AM_tool

```

ENTITY AM_tool_body (* m0 *)
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONE OF(laser, UV, EBM, adhesive, heat));
SUBTYPE OF (tool_body, AM_tool);
tool_wavelength: length_measure;
lens_wavelength: length_measure;
dimension: tool_dimension;
END_ENTITY;

```

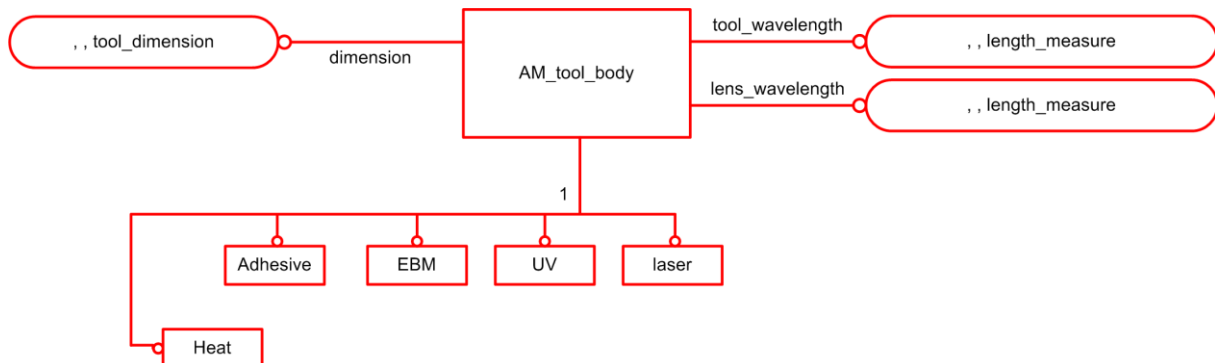


Figure 101 : Diagramme EXPRESS-G de description des AM_tool_body

Les modèles de description des différentes sources d'énergie de fabrication additive (laser, EBM...) ne sont pas réalisés ici, mais devront être incorporés à la norme. De plus, la liste des sources d'énergie n'est pas forcément exhaustive et d'autres sources d'énergie pourront être intégrées à la norme par la suite.

4.8 Modèle complet ISO 14649 pour la fabrication additive

Comme montré sur la Figure 102, les informations présentes dans la norme STEP-NC peuvent se décomposer en quatre parties distinctes : (1) *task description* (parties A1 et

A5 du modèle SADT), (2) *technology description* (parties A3, A4 et A6 du modèle SADT), (3) *tool description* (parties A3 et A4 du modèle SADT) et (4) *geometry description* (partie A2 du modèle SADT). La partie *task description* décrit la séquence logique d'organisation des exécutable et des données. Les détails de chacun des workingsteps sont décrits dans la partie *technology description* en relation avec les parties *tool description* et *geometry description*.

La norme STEP-NC est organisée par niveaux. Au niveau le plus haut, il y a les données communes à tous les procédés de fabrication : usinage et ajout de matière. Puis dans les niveaux inférieurs, on retrouve les parties spécifiques à chacun des procédés de fabrication. Le modèle de données de la Figure 102 montre les éléments du standard de données inhérents à la fabrication par ajout de matière comme les éléments technologiques de la fabrication rapide et les outils de fabrication rapide.

Plus spécifiquement, le *am_workingstep* inclut les *sub_am_workpiece* et les opérations de fabrication rapide (*am_operation*). Puis ensuite chaque *sub_am_workpiece* est composé d'une *base_shape* et des entités définies dans l'ISO 14649-10 et de nouvelles entités de fabrication rapide définies dans la partie spécifique fabrication de la norme ISO 14649-17. Les *sub_am_workpiece* ainsi que les opérations de fabrication associées sont donnés avec leurs réglages de fabrication (puissance, intensité, vitesse du laser...). De plus, on peut noter que la définition des trajectoires des sources d'énergie est optionnelle dans l'ISO 14649, alors que celles-ci sont les principales informations pour les DCN actuels.

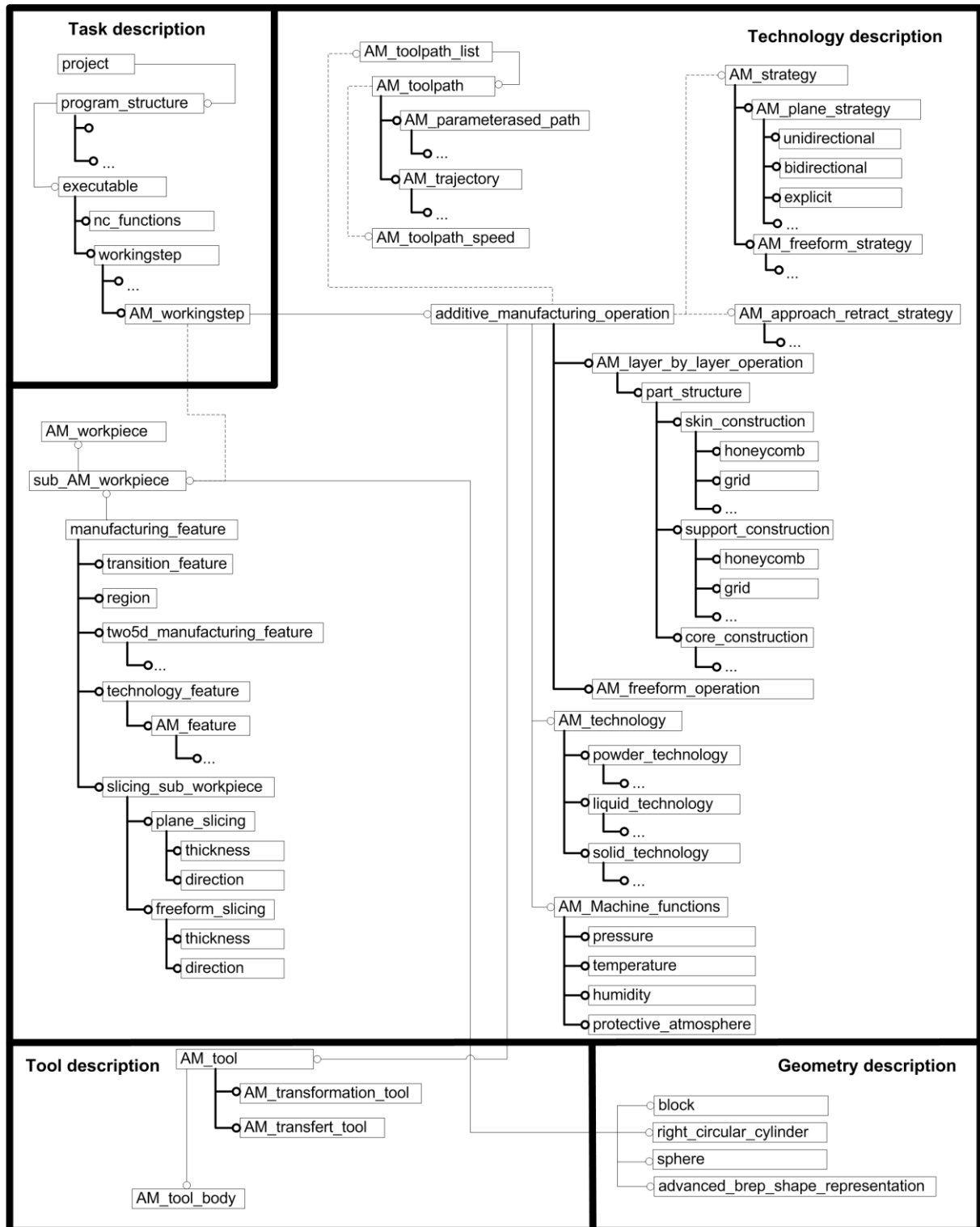


Figure 102 : Modèle de données fabrication additive ISO 14649

5. Conclusion

5.1 Limites du modèle proposé

La première limite du modèle STEP-NC que nous proposons dans nos travaux est d'ordre matériel. En effet, il n'existe à l'heure actuelle aucune machine de fabrication additive équipée de DCN STEP-NC. Les machines de fabrication additive sont pour l'heure équipées majoritairement de DCN propriétaires. Nous proposerons donc une plateforme STEP-NC pour illustrer et valider nos concepts et montrer les avantages de notre modèle. Cette nouvelle plateforme STEP-NC pour la fabrication additive est présentée dans le chapitre 5 de ce manuscrit.

D'autre part comme nous l'avons vu, le modèle STEP-NC que nous proposons s'appuie sur des entités de fabrication. Pour le moment les entités utilisées en usinage sont celles de l'AP-224. Cette situation n'est pas satisfaisante, la reconnaissance d'entités automatique n'étant pas toujours performante et les entités de l'AP-224 pas forcément adaptées aux opérations de fabrication. Une solution serait donc que le concepteur ou le fabricant définisse lui-même ses propres entités de fabrication (comme ce qui est fait dans le modèle STL 2.0 que nous avons décrit dans le chapitre 2). Cette solution éviterait d'avoir à définir de nouvelles entités de fabrication additive, et permettrait de s'affranchir des entités de l'AP-224, qui sont un frein au développement des différents modèles STEP-NC. Ainsi, les entités de fabrication définies seraient mieux adaptées à la fabrication réalisée ensuite.

5.2 Apports du modèle propose

Le format STEP-NC est un format intéressant qui s'appuie sur une programmation basée-entités. C'est actuellement le format basée-entités en fabrication qui est le plus abouti. Cette programmation étant intéressante, nous avons donc proposé dans ce chapitre un nouveau modèle STEP-NC pour les procédés de fabrication par ajout de matière.

Le modèle STEP-NC est un modèle unique qui est basé au milieu de la chaîne numérique. Celui-ci est enrichi à chaque étape de la chaîne numérique de fabrication additive. Cette configuration présente l'avantage d'avoir un unique modèle et donc d'éviter la multiplication des fichiers, la conversion de fichiers, l'utilisation de post-processeurs... et donc d'éventuelles pertes de données ou redondances dans les informations.

Un autre point fort, du modèle que nous proposons, est la mise à jour du modèle STEP-NC fabrication additive. En effet, si des changements interviennent à n'importe quel niveau de la chaîne numérique, le modèle STEP-NC est mis à jour. Cela est permis par l'échange de données bi-directionnel qui permet au modèle STEP-NC d'actualiser toutes les informations liées à la fabrication, la conception ou le directeur de commande numérique.

Le modèle que nous proposons est un modèle générique, qui est indépendant des logiciels de CFAO ou des DCN utilisés. Cela permet d'avoir une préparation de la fabrication qui soit générique et non plus dédiée à un seul type de machine. De plus le modèle ISO 14649 est un modèle interopérable qui permet son intégration sur différents logiciels de CFAO.

Le modèle ISO 14649 fabrication additive permet également d'avoir une portabilité du programme STEP-NC sur toutes les machines de fabrication additive équipées d'un DCN générique. Cela permet d'avoir le même modèle indépendamment de la machine de fabrication additive choisie.

La conservation de données de haut niveau conceptuel au niveau des directeurs de commande numérique permet également d'introduire de l'intelligence au niveau de la machine, avec la constitution d'une base de données et la capitalisation des données dans le modèle STEP-NC.

Enfin, comme nous l'avons vu dans la structuration des données de la norme ISO 14649, les procédés de fabrication par ajout de matière et enlèvement de matière ont une structure commune au niveau de la *part 10*. On peut donc avoir un même modèle qui regroupe les opérations de fabrication par ajout de matière et les opérations de finition en usinage. Cette problématique sera présentée plus en détail dans la suite de ce manuscrit avec le remplacement de nos travaux dans le contexte multi-procédés.

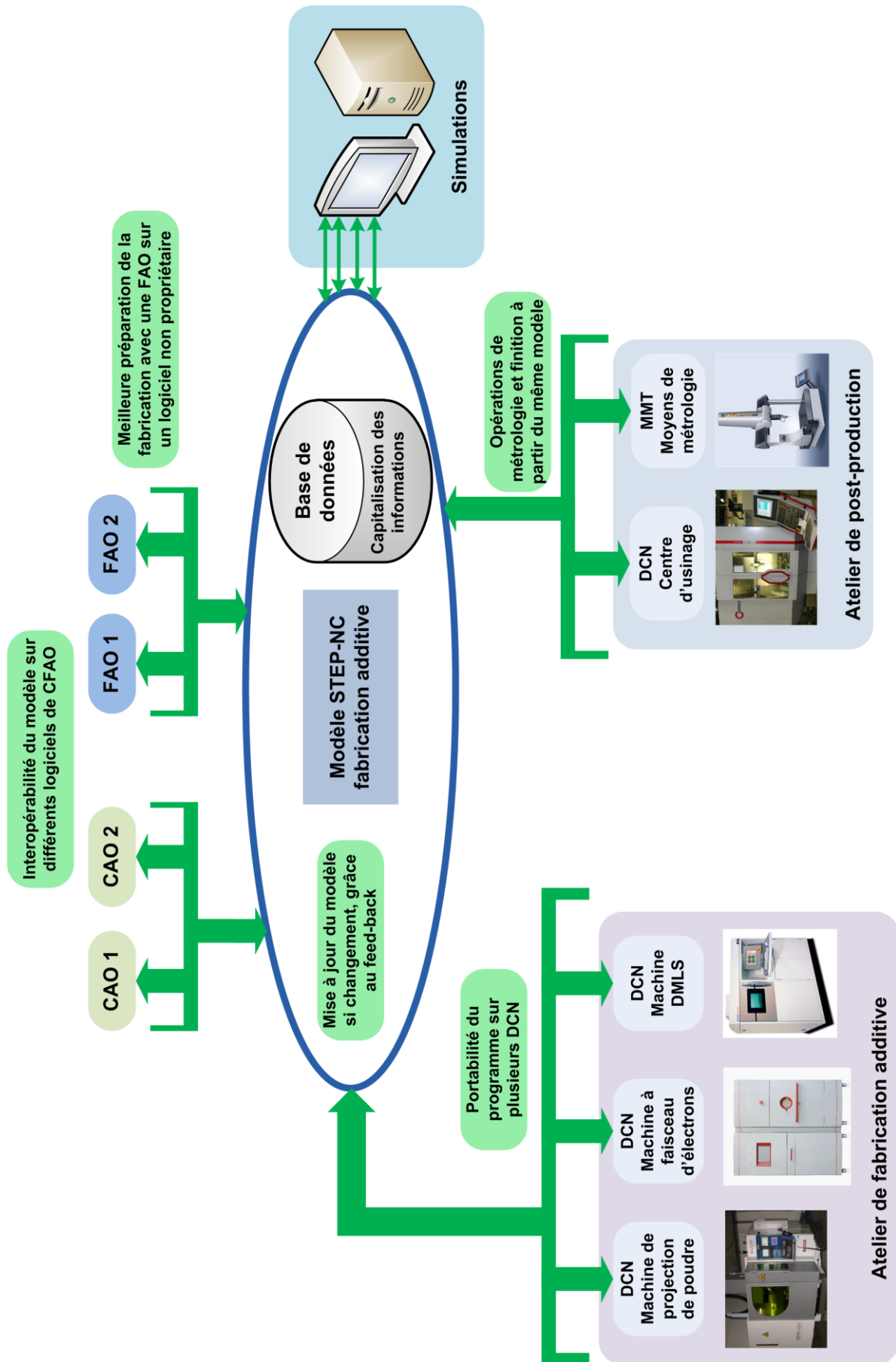


Figure 103 : Possibilités avec notre nouveau modèle STEP-NC fabrication additive

Chapitre 5

Validation du modèle STEP-NC avec la plateforme SPAIM

1. Introduction

Le chapitre précédent a été l'occasion de présenter, notre proposition pour un nouveau modèle STEP-NC pour la fabrication additive. Pour valider ce modèle et montrer la cohérence de sa hiérarchie, nous allons présenter dans ce chapitre une plateforme STEP-NC développée par l'équipe. Cette plateforme de démonstration nous permet de montrer le fonctionnement de notre modèle et d'en valider sa structure. Elle permettra à l'avenir également d'implémenter les futurs travaux de recherche effectués sur le standard ISO 14649 pour la fabrication additive.

Cette plate-forme s'appuie, dans son état actuel, sur une programmation interprétée permettant une rapide diffusion sur des machines de fabrication additive équipées de directeurs de commande numérique génériques. Elle est implémentée sur la machine de projection de poudre du laboratoire (machine CLAD conçue par IREPA laser équipée d'une commande numérique Siemens 840D).

Ainsi dans une première partie, nous montrerons quels sont les objectifs et les attentes vis-à-vis d'une telle plateforme. Cette première partie sera également l'occasion de définir la structure d'une telle plateforme, au travers d'un diagramme SADT. Les différentes étapes du modèles SADT seront présentées.

Dans une seconde partie nous présenterons en détail le module de définition des paramètres de fabrication en fabrication additive que nous proposons. Ce module, nous permet de générer automatiquement un programme STEP-NC pour la fabrication additive qui compose les données d'entrée de notre plateforme ISO 14649 pour la fabrication additive. Ce module est basé sur un programme (PosSFP-AM) qui s'appuie sur un module de reconnaissance d'entité développé par une équipe de recherche coréenne [SUH03]. A partir de la reconnaissance d'entité, nous avons développé la partie définition des paramètres de fabrication additive et génération d'un programme ISO 14649 fabrication additive.

Dans une dernière partie, nous décrirons la plateforme SPAIM (Step-nc Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing). Son concept sera détaillé ainsi que les différents modules qui composent sa structure. Les apports de cette nouvelle plateforme ainsi que les atouts d'une programmation avancée seront présentés. L'évolution vers une plateforme multi-process sera également abordée.

2. Plateforme STEP-NC pour la fabrication additive

Il est important de valider le modèle ISO 14649 pour la fabrication additive mis en place au chapitre précédent. C'est l'objectif de la plateforme STEP-NC développée par l'équipe qui est présentée dans ce chapitre. Celle-ci va nous permet donc de valider les concepts que nous avons présentés précédemment. Elle nous permettra également d'être une plateforme de démonstration pour montrer les apports de l'utilisation d'une chaîne numérique STEP-NC en fabrication additive au niveau de la communauté internationale et des industriels.

Ce paragraphe est l'occasion pour nous de présenter les objectifs d'une telle plateforme. Puis, nous présenterons la structure de la plateforme proposée. Enfin, nous montrerons les nouvelles possibilités de cette plateforme pour la fabrication additive.

2.1 Définition et objectifs de cette nouvelle plateforme

L'ISO 14649 contient toutes les informations nécessaires à la définition d'un projet de fabrication additive d'une pièce comme les entités de fabrication, les stratégies de fabrication, les sources d'énergie, la technologie de fabrication et les informations géométriques. Toutes ces informations doivent être spécifiées comme dans le modèle de données défini dans le chapitre précédent de ce manuscrit. La programmation en ISO 14649 s'avérant être difficile à mettre en place manuellement (contrairement à l'ISO 6983), l'utilisation d'une plateforme STEP-NC complète depuis la création d'un programme STEP-NC générique à partir des informations de la CAO jusqu'à la fabrication est donc dès lors indispensable. L'architecture d'une telle plateforme doit donc prendre en compte toutes les spécificités inhérentes au standard STEP-NC. Les différents objectifs d'une telle plateforme sont présentés ci-dessous :

- (1) Parfait accord et compréhension de l'ISO 14649 et des protocoles d'application de l'ISO 10303. C'est le point fondamental de cette plateforme. Elle doit pouvoir comprendre en entrée des informations venant de l'ISO 10303-238 **[ISO07]** et 10303-224 **[ISO01]** (même si pour le moment les logiciels de CAO ne savent pas générer des fichiers en AP 224).
- (2) Reconnaissance automatique des entités de fabrication de l'AP 224 car l'ISO 14649 est basée sur ce type d'entités de fabrication.
- (3) Utilisation d'une interface reliée à internet. Cela permet de pouvoir faire de l'e-manufacturing et donc d'avoir la CAO, la FAO et la fabrication sur des sites différents.
- (4) Bon échange de données entre les différents modules de la plateforme. Aucune information ne doit être modifiée ou occultée lors de la communication entre les différents modules de la plateforme.
- (5) S'adapter à des DCN génériques pour pouvoir rapidement être implémentée sur des machines de fabrication additive.
- (6) Si le DCN ne comprend pas directement le format ISO 14649, le format au niveau du DCN (généralement l'ISO 6983) doit être complètement transparent.

- (7) Avoir une interface homme/machine conviviale et permettant de gérer les paramètres de fabrication additive facilement.
- (8) Editer le programme STEP-NC facilement. C'est-à-dire pouvoir faire des modifications au niveau de l'interface homme/machine sur la géométrie ou les paramètres de fabrication qui soient pris en compte au niveau du programme ISO 14649.
- (9) Permettre les échanges de données dans les deux sens entre tous les composants de la chaîne numérique CAO-FAO-DCN. Ceci permet d'avoir une mise à jour continue des différents modèles composant la chaîne numérique si des modifications interviennent.
- (10) Pouvoir admettre des modules d'optimisation ou de suivi de fabrication en temps réel au sein de la plateforme.
- (11) Avoir une structure pouvant accueillir d'autres procédés de fabrication (tels que les procédés d'usinage), pour pouvoir suivre les différentes phases de fabrication d'un produit faisant appel à plusieurs procédés de fabrication.

La plateforme que nous allons proposer dans la suite de ce chapitre devra parfaitement satisfaire tous ces objectifs. Différents modules sont présentés pour répondre à cette problématique.

2.2 Proposition de structure pour une plateforme STEP-NC fabrication additive

Dans ce paragraphe, nous allons présenter une structure fonctionnelle basée sur toutes les considérations mises en avant précédemment pour l'élaboration d'une structure de plateforme STEP-NC en fabrication additive. Le diagramme SADT de la Figure 104 détaille toutes les fonctions qui sont implémentées sur cette plateforme.

Cette proposition de plateforme STEP-NC se décompose en neuf modules principaux (Figure 104) :

- (A1) Module de reconnaissance automatique des entités de fabrication additive.
- (A2) Module de génération automatique d'un programme STEP-NC.
- (A3) Module d'analyse des informations présentes dans le modèle STEP-NC généré.
- (A4) Module de génération des trajectoires de la source d'énergie.
- (A5) Module d'optimisation du procédé de fabrication additive.
- (A6) Module de simulation de la fabrication additive.
- (A7) Module de validation des trajectoires de fabrication additive.
- (A8) Module de réalisation de la fabrication additive.
- (A9) Module de suivi de la fabrication additive et de capitalisation de données sur la fabrication.

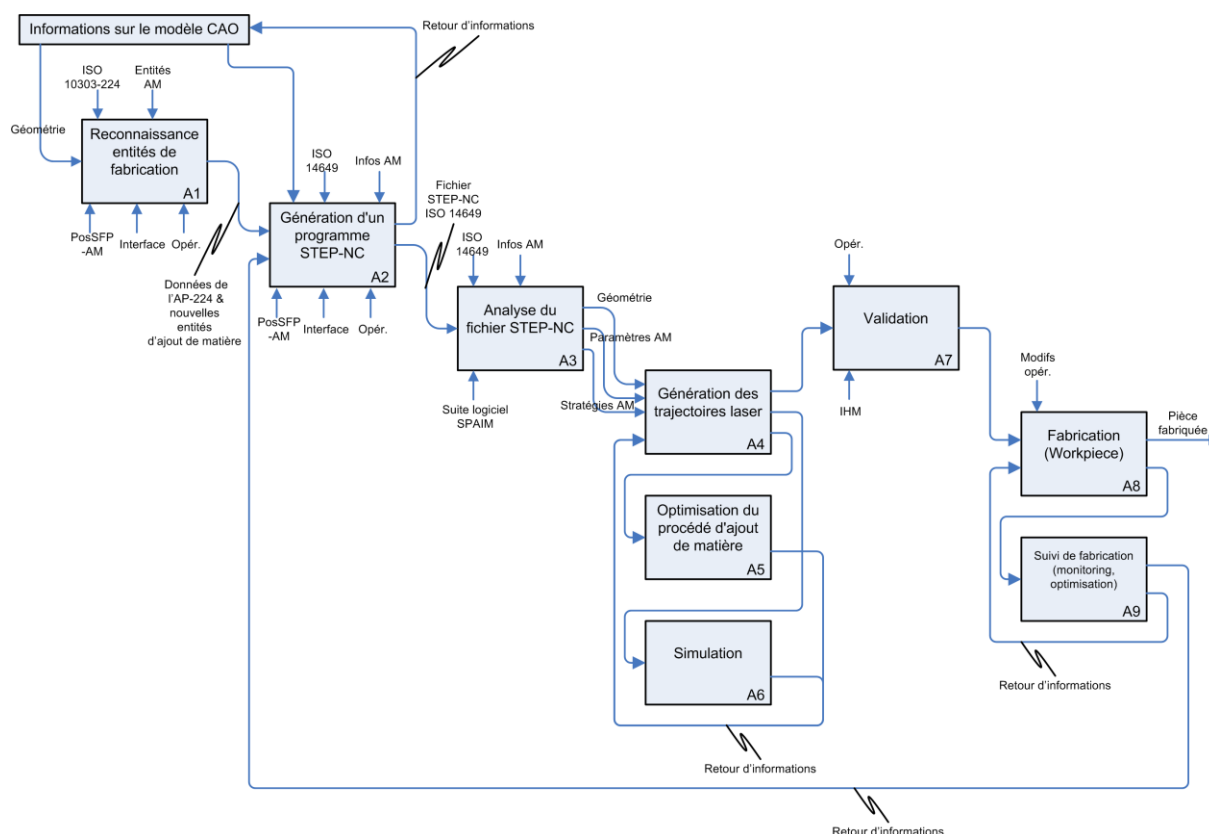


Figure 104 : Structure fonctionnelle d'une plateforme STEP-NC pour la fabrication additive

Le module de reconnaissance des entités de fabrication additive (A1) a pour but de générer la liste des entités de fabrication comme défini dans le modèle de l'ISO 14649 (voir chapitre 4) à partir des données du modèle CAO de la pièce.

A partir des données fournies par le module de reconnaissance d'entités (A1), des modèles de données de la norme ISO 14649, et des renseignements sur la fabrication fournis par un opérateur (à l'aide d'une interface simple) un programme STEP-NC est généré automatiquement (A2). Les deux modules (A1) et (A2) sont détaillés dans le paragraphe suivant de ce chapitre.

Le module (A3) est un module d'analyse du fichier STEP-NC généré par le module (A2). Il permet d'analyser toutes les informations du fichier STEP-NC et de distinguer les informations sur la géométrie, les paramètres de fabrication additive et les stratégies de fabrication. Ainsi, toutes ces informations peuvent être traitées convenablement par le module (A4), qui permet de générer les trajectoires outil.

Le module (A4) permet lui à partir des informations fournies par le programme STEP-NC ISO 14649 de générer un programme dans le code du DCN utilisé (par exemple code-G). On peut voir sur la Figure 105 que ce module se décompose en sept sous-modules :

- Le premier qui lit, exécute et interprète les données de fabrication additive (A41).
- Les modules (A42), (A43) et (A44) permettent de définir le modèle tranché de la pièce à fabriquer (module spécifique par rapport au modèle usinage). Ainsi le module (A42) permet d'obtenir pour chaque entité la direction optimale de fabrication, le module (A43) détermine à partir de cette direction quels sont les besoins en supports, puis à partir de ces informations, le modèle général tranché est généré.

- Le module (A45) en parallèle des trois modules précédents analyse à partir des données du fichier STEP-NC quels sont les supports préformés qui serviront de supports aux entités de fabrication additive.
- Le module (A46) génère les trajectoires de fabrication additive, à partir des informations obtenues précédemment.
- A partir des informations fournies par ces modules un dernier module (A47) traite ces données et génère un programme dans le langage de programmation du DCN utilisé.

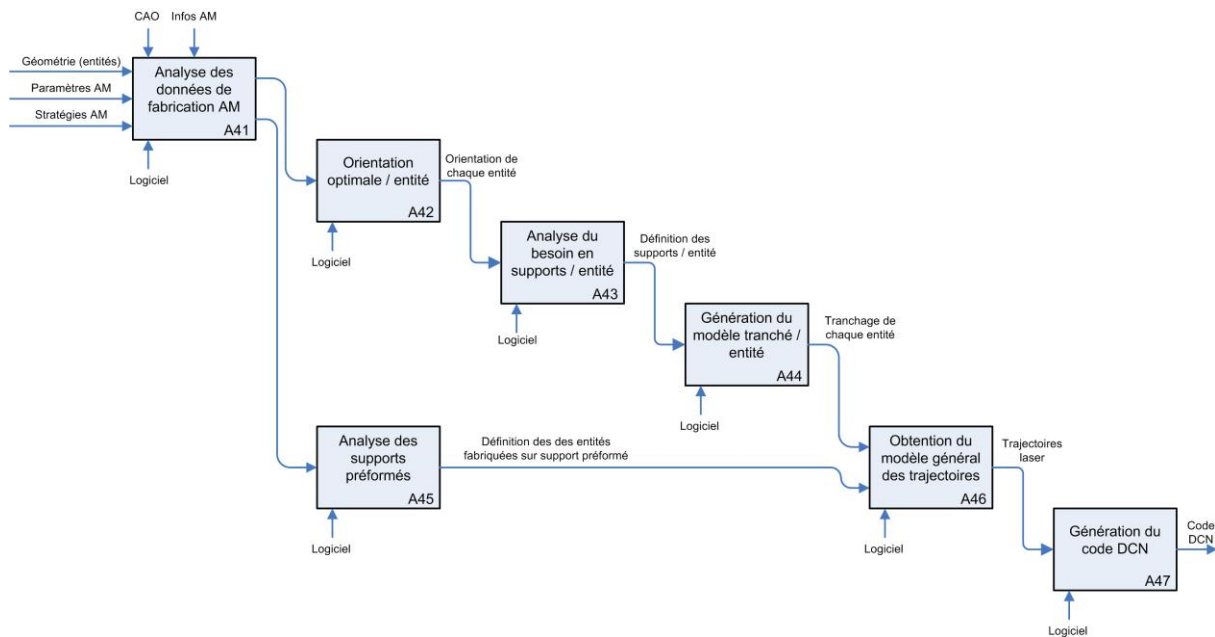


Figure 105 : Module d'obtention du code DCN à partir du programme STEP-NC

Les modules (A5) et (A6) sont des modules d'optimisation et simulation de la fabrication additive. Pour le moment ces modules ne sont pas développés dans la plateforme SPAIM que nous allons présenter dans la suite de ce chapitre. Mais, la structure de la plateforme que nous proposons permet l'intégration de ce genre de modules.

Le module (A7) est un module de validation des trajectoires outil générées par le module (A5).

Le module (A8) de la plateforme est le module qui permet à partir des informations pour le DCN de réaliser la fabrication du AM_workpiece. On peut remarquer au niveau de ce module que des modifications au niveau de la machine (par l'intermédiaire d'une interface) sont réalisables (géométrie, source d'énergie, stratégies...). Ensuite ces modifications sont directement renvoyées au niveau du module (A2) pour régénérer un programme STEP-NC prenant en compte ces changements, puis ces informations sont renvoyées au niveau du modèle CAO pour une reconstruction du modèle 3D. Cela permet d'avoir un total échange bidirectionnel depuis la CAO jusqu'au DCN.

Le dernier module est le module (A9), qui permet d'avoir un suivi de la fabrication et de capitaliser des informations sur la fabrication additive. Ce module permet ainsi de mieux maîtriser la fabrication additive et d'avoir un retour d'information sur les paramètres de fabrication additive.

Toute cette structure est développée et illustrée dans les paragraphes suivants avec tout d'abord la présentation des modules d'obtention d'un programme STEP-NC, puis une plateforme développée au niveau du laboratoire de l'IRCCyN : la plateforme SPAIM (Step-nc Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing).

2.3 Conclusion

Dans le premier chapitre, nous évoquons les objectifs d'une mise en place d'une chaîne numérique de haut niveau conceptuel pour la fabrication additive :

- Intégration de la chaîne numérique CAO-FAO-DCN dans un unique standard de données de haut niveau conceptuel.
- Pas de perte de données durant les différentes étapes de la chaîne numérique et les post traitements.
- Non multiplication des fichiers de données dans la chaîne numérique : un fichier unique regroupant toutes informations des étapes du projet est l'objectif à atteindre.
- Echange bidirectionnel des données au niveau de toutes les étapes du projet de fabrication.
- Exploitation des données facilement.
- Pas d'opérations de post-processing dans la chaîne numérique.

Le second chapitre, nous a permis de mettre en avant que le standard STEP-NC était le standard de haut niveau conceptuel avec une programmation basée entité qui était le plus développé. Nous avons donc proposé un modèle STEP-NC pour la fabrication additive dans le chapitre 4.

La plateforme STEP-NC telle que nous la proposons dans ce chapitre, permet de valider le modèle mis en place aux chapitres précédents. Elle permet également, de par la structure proposée, de répondre aux objectifs d'amélioration de la chaîne numérique en fabrication additive. Dans la suite de ce chapitre, nous allons présenter en détail les modules qui composent cette plateforme et les nouvelles possibilités offertes par cette plateforme.

3. Génération automatique d'un programme STEP-NC pour la fabrication additive

3.1 Définition

La plateforme STEP-NC développée nécessite en données d'entrée l'introduction d'un fichier STEP-NC. Nous proposons de répondre à cette problématique dans ce paragraphe, avec une proposition de logiciel pour la génération automatique d'un fichier STEP-NC fabrication additive. Le logiciel que nous proposons s'appuie sur la reconnaissance d'entités développée par l'équipe du professeur Suh [SUH03] avec leur logiciel PosSFP. Le logiciel qu'ils ont développé permet la génération automatique d'un programme STEP-NC pour l'usinage. A partir de cette base, nous avons programmé en C++, le reste du logiciel pour obtenir un programme STEP-NC conforme au modèle ISO 14649 proposé dans le chapitre précédent de ce manuscrit.

Le module PosSFP permet de créer le fichier ISO 14649 (STEP-NC) d'une pièce à partir des informations de géométrie d'un fichier STEP AP203 généré par n'importe quel logiciel de CAO.

Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter le fonctionnement de ce nouveau logiciel PosSFP-AM, étape par étape, jusqu'à la définition du programme STEP-NC pour la fabrication additive, qui compose les données d'entrée pour notre plateforme STEP-NC.

3.2 Proposition d'un nouveau programme PosSFP-AM

Pour l'instant, aucun logiciel de CFAO ne permet la génération automatique d'un fichier STEP-NC. Par ailleurs, l'écriture d'un fichier STEP-NC manuellement s'avère être beaucoup trop fastidieux et compliqué. Les données d'entrée de la plateforme STEP-NC étant des fichiers STEP-NC, nous allons donc proposer un logiciel qui génère automatiquement un fichier STEP-NC à partir de la CAO de la pièce à fabriquer et de ses paramètres de fabrication.

Le fichier STEP-NC généré automatiquement par ce logiciel doit contenir toutes les informations du modèle STEP-NC fabrication additive que nous avons mis en place dans le chapitre précédent de ce manuscrit.

Comme évoqué précédemment, le nouveau logiciel de génération d'un fichier STEP-NC fabrication additive s'appuie sur un logiciel coréen PosSFP [SUH03]. Notre équipe de recherche a une bonne connaissance de ce logiciel avec l'enrichissement de modèles dédiés au fraisage, avec de nouvelles stratégies de fabrication à motifs (trochoïdales et tréflage) [LAG08].

3.2.1 Reconnaissance automatique des entités de fabrication

Le premier module du modèle SADT que nous avons présenté sur la Figure 104 (A1), est un module de reconnaissance automatique des entités de fabrication. La structure de ce module implémenté dans PosSFP-AM est présentée sur le diagramme SADT de la Figure

106. Ce module se décompose en trois étapes. Tout d'abord la visualisation de la géométrie (A11), la reconnaissance des entités de fabrication (A12) et enfin la vérification et la validation du modèle par l'opérateur (A13).

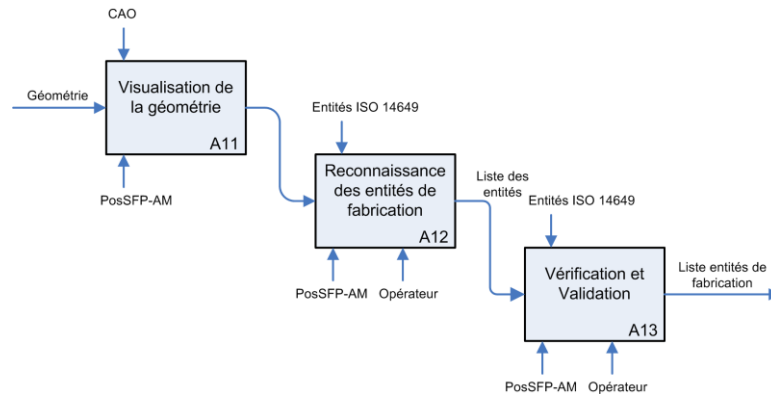


Figure 106 : Module de reconnaissance automatique des entités de fabrication

Comme, nous l'avons présenté précédemment, la première étape consiste en une lecture de la géométrie du fichier STEP. Dans le cadre du développement de ce prototype, seuls les fichiers au format Parasolid de Solidworks sont pour l'instant lisibles. Cependant, à terme, tout type de fichier de géométrie STEP pourra être lu et traité. Le système de reconnaissance de forme développé par l'équipe de recherche coréenne prend alors le relais pour reconnaître automatiquement les entités géométriques (voir Figure 107).

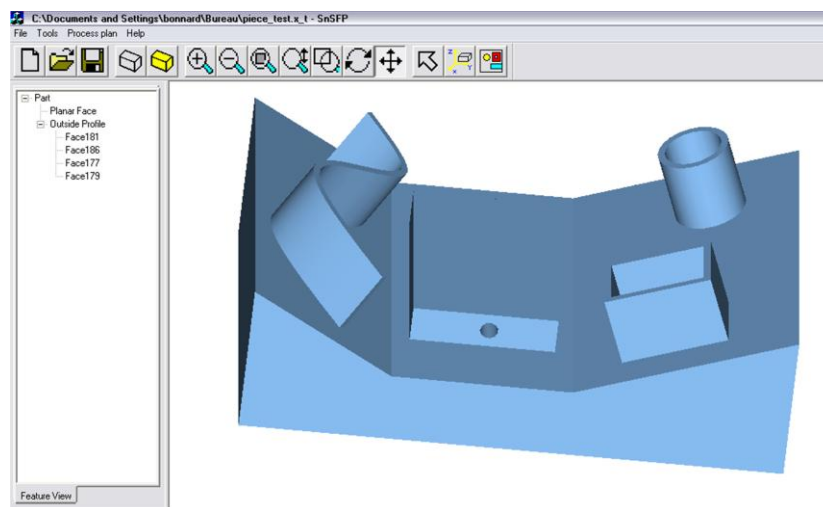


Figure 107 : Importation du modèle CAO dans PosSFP-AM et reconnaissance des entités de fabrication

3.2.2 Génération automatique d'un programme ISO 14649

Dans le modèle SADT pour une plateforme STEP-NC que nous avons proposé précédemment sur la Figure 104, le module (A2) est le module de génération automatique d'un programme STEP-NC. Ce programme STEP-NC est le point d'entrée de notre plateforme. Sur la Figure 108 ci-dessous, le détail de ce module développé au sein de PosSFP-AM est présenté. Ce module est composé de cinq étapes : le choix des opérations

de fabrication additive (A21), le choix des outils associés à chacune des opérations (A22), le choix des paramètres de fabrication additive (A23), la validation et la vérification des informations (A24) et enfin la génération automatique du programme STEP-NC (A25). Ces différentes étapes et la façon dont elles sont implémentées dans PosSFP-AM sont décrites dans la suite de cette partie.

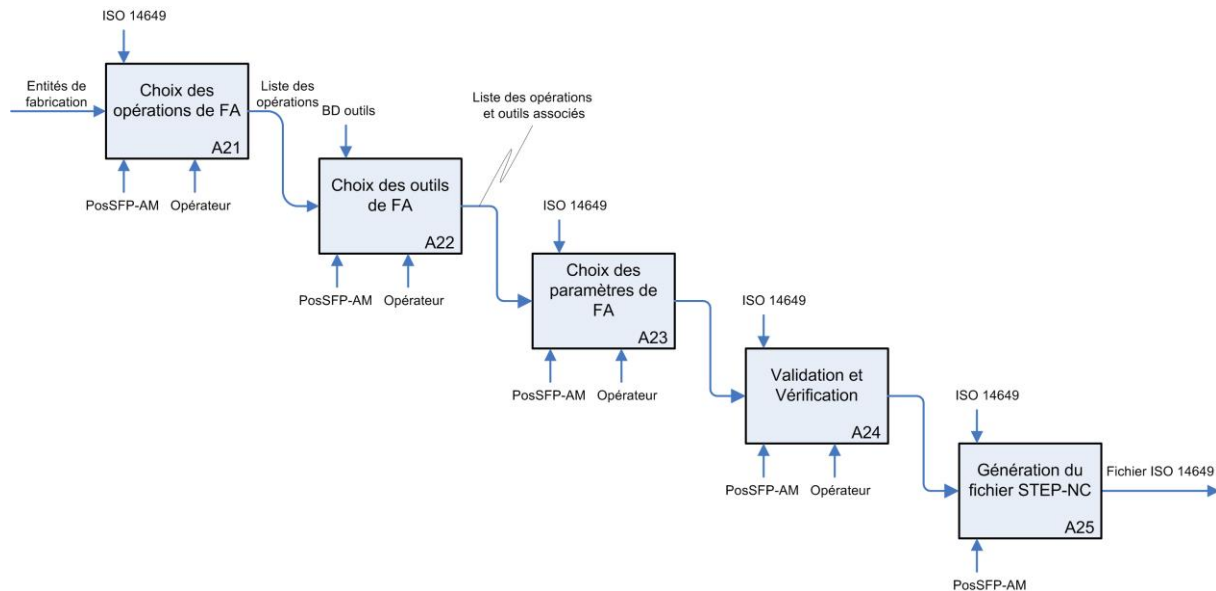


Figure 108 : Module de génération automatique d'un programme ISO 14649

3.2.2.1 Choix des opérations de fabrication additive associées à chaque entité de fabrication

Une fois la reconnaissance automatique des entités effectuée par le logiciel, l'étape suivante consiste au choix de l'opération de fabrication additive pour chaque entité de fabrication (voir Figure 109), cette étape à réaliser dans PosSFP-AM est l'étape (A21) du diagramme SADT de la Figure 108. Pour l'instant seules les opérations `layer_by_layer_operation` ont été implémentées dans le logiciel PosSFP-AM. Les opérations de fabrication additive 5 axes pourront venir enrichir le logiciel par la suite.

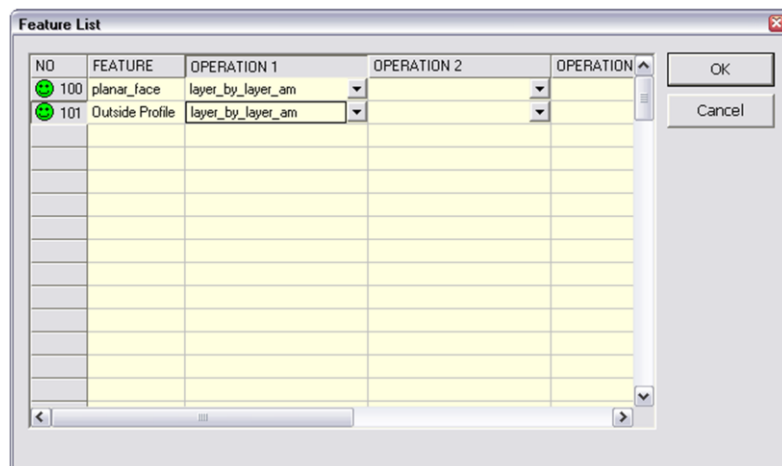


Figure 109 : Choix des opérations de fabrication additive dans PosSFP-AM

3.2.2.2 Réglage des paramètres de chaque opération de fabrication additive

Lorsque toutes les opérations associées aux entités de fabrication additive ont été définies, une liste des différentes opérations de fabrication additive est créée. Ensuite, pour chacune des opérations la source d'énergie utilisée, ainsi que les paramètres de fabrication associés doivent être renseignés (voir Figure 110).

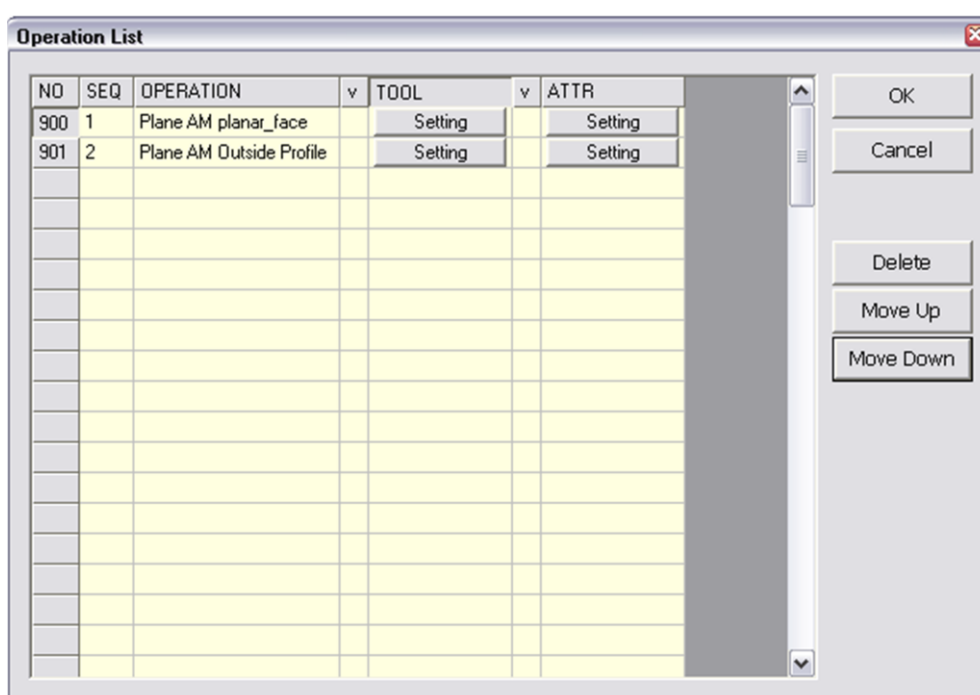


Figure 110 : Liste des opérations de fabrication additive qui permet de régler les paramètres associés

Le choix des outils se fait dans une liste d'outils définis dans une base de données (voir Figure 111). Pour chaque opération de fabrication additive, un outil doit être défini. La base de données présente dans PosSFP-AM peut être enrichie par l'utilisateur, en fonction des outils dont il dispose. Ce module de PosSFP-AM est issu de l'étape (A22) du diagramme SADT pour la génération automatique d'un programme STEP-NC (voir Figure 108).

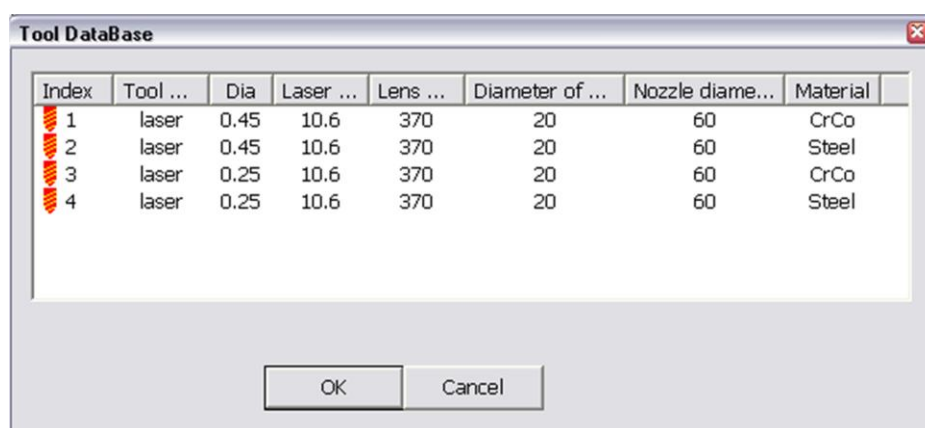


Figure 111 : Choix d'une source d'énergie dans PosSFP-AM

Il y a six rubriques de paramètres de fabrication additive qui doivent être définies au niveau du logiciel PosSFP-AM (paramètres qui sont définis dans le modèle ISO 14649 fabrication additive présenté dans le chapitre précédent). Le choix de ces paramètres est visible sur le diagramme SADT de la Figure 108 au niveau de l'étape (A23) :

- Les paramètres généraux de l'opération de fabrication additive.
- Les paramètres liés aux spécificités de l'opération de fabrication choisie.
- Les paramètres définissant la stratégie de fabrication additive.
- Les paramètres de la chambre de fabrication.
- Les paramètres liés à la technologie de fabrication additive.
- Et les stratégies d'approche et de retrait.

Les premiers paramètres de fabrication additive qui doivent être définis dans PosSFP-AM sont les paramètres généraux de fabrication (voir Figure 112). Suivant le type d'opération de fabrication additive, différents paramètres pourront être renseignés :

- Les trajectoires des outils.
- L'orientation de la pièce par rapport à la source d'énergie.
- Le plan de retrait.
- Le point de départ.
- La distance du laser à la pièce.

Operation Attributes		
AM Machine Functions	AM Technology	App/Ret Strategy
General	AM layer by layer Operation	AM Strategy
toolpath		
tool direction		
retract plane	12	
start point		
laser distance	0	

Figure 112 : Définition générale des paramètres de fabrication dans PosSFP-AM

L'étape suivante consiste en la définition des paramètres liés à l'opération de fabrication additive choisie précédemment (voir Figure 113). Pour les opérations de fabrication additive AM layer_by_layer_operation, les paramètres à définir sont les mêmes que ceux définis dans notre modèle ISO 14649 pour la fabrication additive que nous avons précédemment défini. Les différents composants de la pièce sont ainsi définis :

- Peau de la pièce.
- Corps de la pièce.

- Eventuels supports de la pièce.

Associé à chacune de ces parties de la pièce, les paramètres de la structure de la pièce sont également définies (motifs, taille, ...).

Section	axial dimension	radial dimension	number of layer fused	pattern
Skin construction	1.000	1.000	1	FULL
Core construction	3.500	3.000	3	CHESS
Support construction	2.000	2.000	1	CHESS

Figure 113 : Définition des paramètres liés à la structure de la pièce dans PosSFP-AM

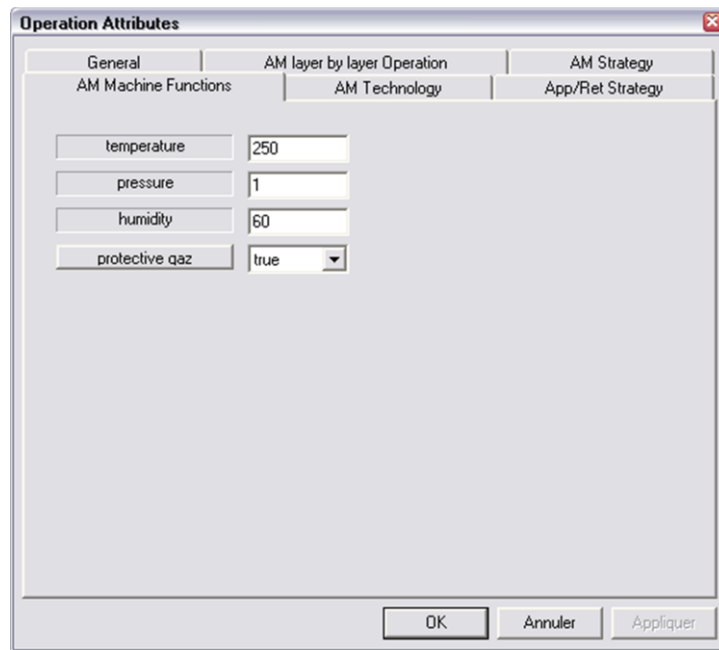
Après avoir défini l'opération de fabrication additive ainsi que la structure de la pièce, les paramètres liés à la stratégie de fabrication additive doivent également être renseignés (voir Figure 114). Dans le logiciel PosSFP-AM, pour l'instant seule la stratégie unidirectional est opérationnelle, mais les autres stratégies pourront être développées (bidirectional...). De nouvelles stratégies de fabrication additive pourront venir enrichir le logiciel.

Section	Parameter	Value
Common	layer thickness	0.02
	allow multiple passes	true
Strategy	unidirectional	<input checked="" type="radio"/>
	bidirectional	<input type="radio"/>
	contour parallel	<input type="radio"/>
	bidirectional contour	<input type="radio"/>
	contour bidirectional	<input type="radio"/>
	contour spiral	<input type="radio"/>
Parameters	laser direction	1.0.0
	layer direction	
	stepover direction	
	layermode	conventio
	connection	

Figure 114 : Définition de la stratégie de fabrication dans PosSFP-AM

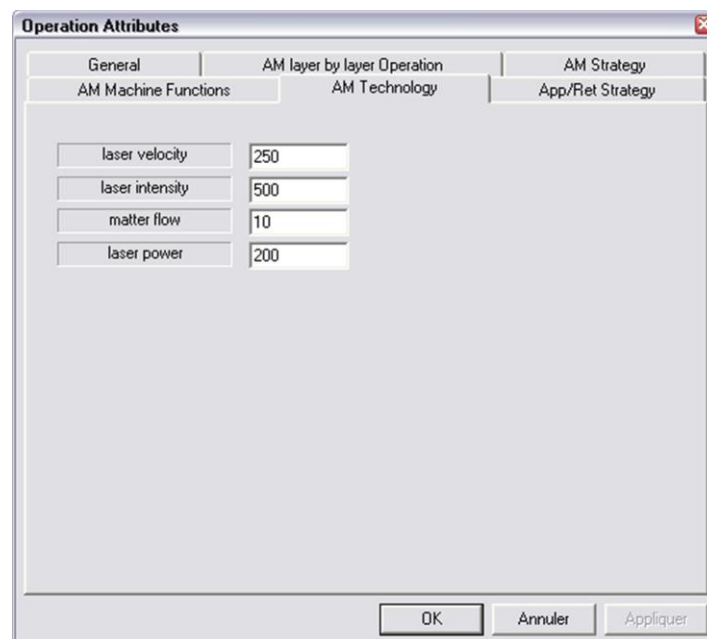
Les paramètres de fabrication liés à la chambre de fabrication sont aussi à définir dans PosSFP-AM (voir Figure 115). S'il n'y a pas de chambre, la valeur des paramètres doit être mise à zéro. Ces paramètres sont les mêmes que ceux définis dans le modèle ISO 14649 que nous avons présenté dans le chapitre précédent. Les paramètres sont les suivants :

- La température.
- La pression de l'enceinte.
- L'humidité de l'enceinte.
- La présence ou non d'une protection gazeuse.



The screenshot shows a window titled "Operation Attributes" with a close button in the top right corner. It contains three tabs: "General", "AM layer by layer Operation", and "AM Strategy". The "General" tab is selected, and within it, the "AM Machine Functions" sub-tab is active. There are four input fields: "temperature" with the value 250, "pressure" with the value 1, "humidity" with the value 60, and "protective gaz" with a dropdown menu showing "true". At the bottom right, there are three buttons: "OK", "Annuler", and "Appliquer".

Figure 115 : Définition des paramètres de l'enceinte de fabrication dans PosSFP-AM



The screenshot shows the same "Operation Attributes" window, but with the "AM Technology" sub-tab selected under the "General" tab. There are four input fields: "laser velocity" with the value 250, "laser intensity" with the value 500, "matter flow" with the value 10, and "laser power" with the value 200. The "OK", "Annuler", and "Appliquer" buttons are still present at the bottom right.

Figure 116 : Définition des paramètres liés à la technologie de fabrication dans PosSFP-AM

Les derniers paramètres de fabrication à régler sont les paramètres liés à la technologie de fabrication additive choisie (voir Figure 116). Ainsi, pour une opération de fabrication additive couche par couche avec un laser, la vitesse du laser, l'intensité du laser, le flux de matière et la puissance du laser doivent être définis.

3.2.2.3 Génération du programme STEP-NC fabrication additive

Une fois tous les paramètres de fabrication liés à chacune des opérations de fabrication additive réglés, le programme STEP-NC peut être généré, c'est la dernière étape de la structure du diagramme SADT de la Figure 108 (voir Figure 117). On retrouve dans ce programme toute la structure du modèle ISO 14649 mise en place dans le chapitre précédent pour la fabrication additive. Ce programme STEP-NC ainsi généré servira de point d'entrée, pour la plateforme STEP-NC que nous allons proposer dans le paragraphe suivant (plateforme SPAIM).

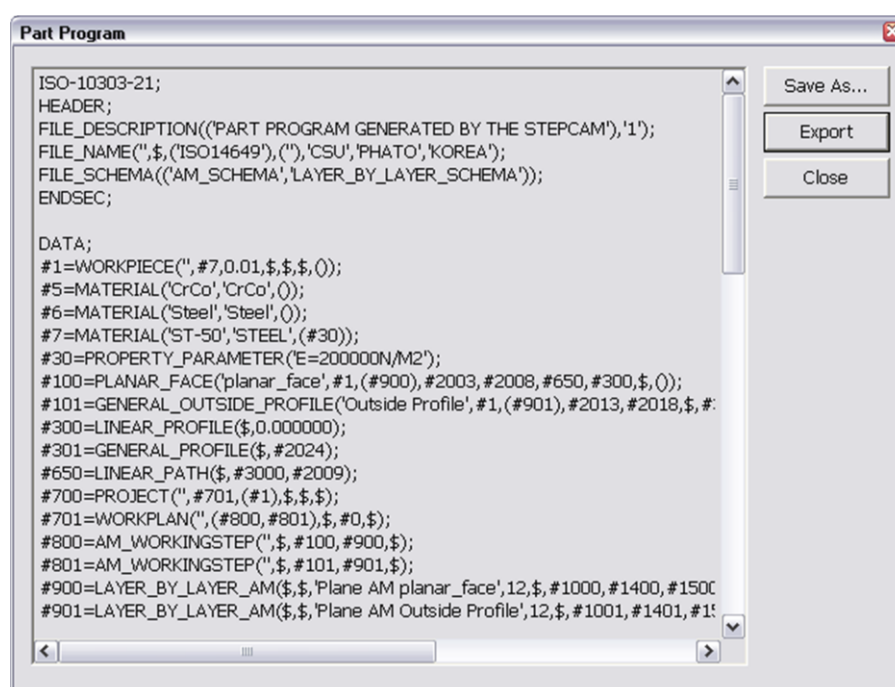


Figure 117 : Programme STEP-NC fabrication additive généré par PosSFP-AM

3.3 Conclusion

3.3.1 Limites du programme PosSFP-AM de génération automatique d'un fichier STEP-NC fabrication additive

Certaines limites persistent au niveau du programme STEP-NC PosSFP-AM. Tout d'abord, le logiciel ne permet pas pour le moment de lire les fichiers STEP AP-224. Seuls les fichiers enregistrés en Parasolid peuvent être ouverts par PosSFP-AM. Ceci implique que le programme ne reconnaît pas toutes les entités de fabrication. On ne peut donc pas régler les

paramètres pour toutes les entités d'une pièce. Nous verrons dans la suite comment nous avons pallié ce problème sur la plateforme que nous proposons.

3.3.2 Apports de ce nouveau programme

Aucun logiciel ne permet de générer un programme STEP-NC pour la fabrication additive. Cela posait un problème pour les données d'entrée nécessaires à la plateforme STEP-NC fabrication additive que nous avons développées. Nous avons donc proposé un logiciel qui permette d'obtenir automatiquement un programme STEP-NC fabrication additive. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur le module de reconnaissance d'entités du logiciel coréen PosSFP. Puis nous avons programmé, à partir du modèle ISO 14649 présenté au chapitre 4 de ce manuscrit, une interface qui permette de définir toutes les caractéristiques (paramètres liés à la fabrication...) de notre modèle. Ensuite, à partir de ces informations, nous avons programmé la génération automatique du programme STEP-NC, qui doit être en accord avec la structure de notre modèle défini auparavant.

Par ailleurs, l'ouverture de fichiers STEP-NC par le programme PosSFP-AM permet de rouvrir des fichiers STEP-NC ce qui est intéressant pour la plateforme que nous avons mise en place. En effet, une communication dans les deux sens entre le logiciel PosSFP-AM et la machine permet d'avoir du feed-back et donc d'avoir le fichier STEP-NC fabrication additive toujours à jour. Et cela, même si des changements au pied de la machine ont été effectués.

4. Chaîne numérique STEP-NC en fabrication additive avec la plateforme SPAIM

La plateforme SPAIM présentée dans ce chapitre est une plateforme STEP-NC basée sur une programmation interprétée. Cette plateforme à l'origine a été développée au sein de notre équipe de recherche pour l'usinage. Ces travaux, nous ont servi d'expérience quant à l'intégration de la plateforme SPAIM sur une machine de projection de poudre CLAD (Figure 118), pour valider les concepts que nous avons présentés précédemment.



Figure 118 : Machine de projection de poudre de l'IRCCyN procédé CLAD

4.1 Organisation et fonctionnement

S'appuyant sur l'architecture présentée précédemment la plateforme SPAIM est composée de plusieurs modules d'exécution pilotés par des applications Delphi, permettant le lien entre ces différents éléments (voir Figure 119).

Cette plateforme permet la lecture et le traitement de fichier STEP-NC généré en ISO 14649 et sa conversion en gamme de fabrication et trajectoires des sources d'énergie pour chaque opération de fabrication additive. Il est donc nécessaire de lui fournir en entrée un fichier ISO 14649, c'est-à-dire les informations sortant du module (A2) des modèles SADT des Figure 104 et Figure 105. Le programme ISO 14649 fourni en entrée de la plateforme SPAIM est issu comme nous l'avons présenté précédemment dans ce chapitre du logiciel

que nous avons développé PosSFP-AM. Il est possible de plus d'intégrer cette plateforme sur n'importe quelle machine munie d'un DCN générique.

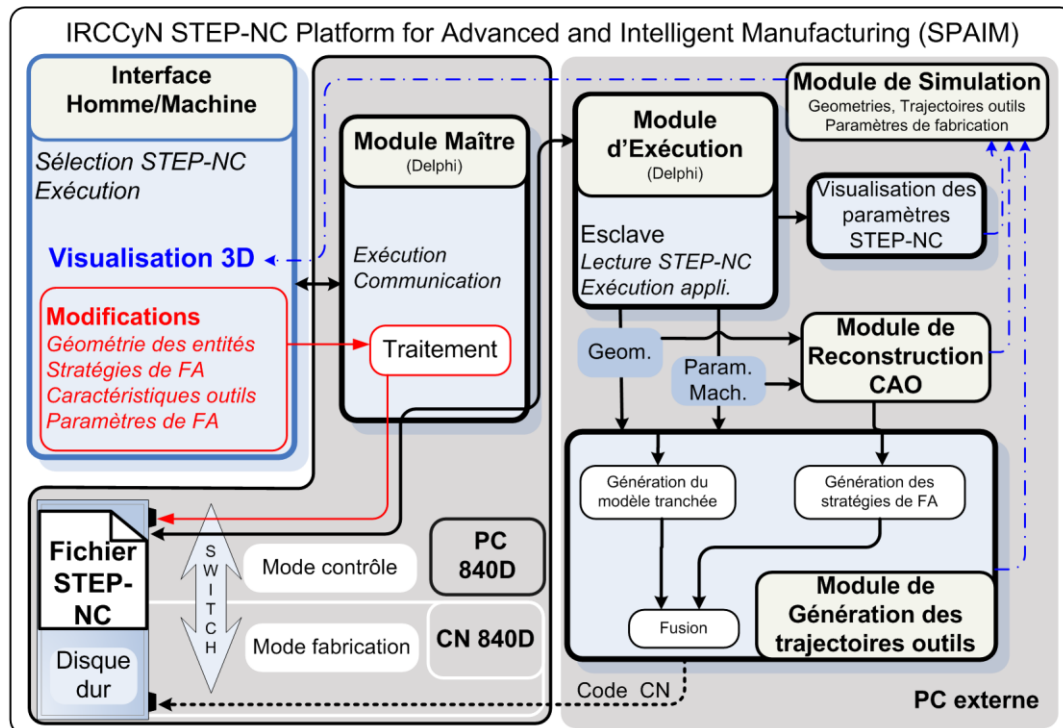


Figure 119 : Structure de la plateforme SPAIM pour la fabrication additive [LAG09b]

La plateforme SPAIM pour la fabrication additive est composée de plusieurs modules, qui sont contrôlés et exécutés par des applications Delphi. Certains d'entre eux sont installés directement au niveau du directeur de commande numérique de la machine, d'autres se trouvent sur un PC externe pour conserver la puissance de calcul du DCN. En effet, tous les modules présents sur le PC externe peuvent être implémentés sur le DCN s'il y a des capacités de calcul suffisantes. Cette solution est complètement transparente pour l'utilisateur. Le PC externe peut être vu comme une augmentation des capacités de calcul du DCN.

Les principaux modules de la plateforme SPAIM sont les suivants :

- *Interface Homme/Machine* : Ce module constitue le lien entre l'utilisateur et les éléments de la plateforme. Sur cette interface, on peut voir une représentation 3D de la pièce, les paramètres de la fabrication additive (outils, entités de fabrication, trajectoires outil...) et un arbre de construction du fichier STEP-NC (Figure 120). On peut à partir de cette interface faire des modifications au niveau de l'arbre de construction du fichier STEP-NC et visualiser ces changements, ainsi que contrôler les trajectoires outil. Ce module permet également l'affichage des résultats des simulations effectuées.
- *Module maître* : il est présent au niveau du DCN de la machine. Il permet l'exécution des ordres de l'utilisateur en commandant les modules d'exécution qui sont présents sur un PC distant grâce au réseau internet. Lorsque des modifications sont opérées au niveau des paramètres de fabrication ou

géométriques, c'est lui qui localise et fait les changements au niveau du fichier STEP-NC.

- *Module d'exécution* (module A3 du diagramme SADT de la Figure 104) : A partir des ordres du module maître, il lit et traite les données STEP-NC pour donner des informations au module de génération des trajectoires (modules A4 du diagramme SADT de la Figure 104).
- *Module de reconstruction CAO* : C'est un module automatique qui permet de reconstruire un modèle CAO à partir des informations géométriques des entités de fabrication des données STEP-NC. Cette reconstruction du modèle CAO est possible grâce à la suite de logiciel de CFAO Delcam (PowerShape et PowerMill). Le modèle CAO est ensuite utilisé par le module de génération de trajectoires pour générer des trajectoires source d'énergie adaptées. Cela permet de faire remonter l'information (comme sur le diagramme SADT de la Figure 104) depuis ce module jusqu'au fichier STEP-NC à travers le module de simulation et donc d'assurer l'échange bidirectionnel des données.
- *Module de génération de trajectoires source d'énergie* : Ce module est présent sur le PC distant et créer les trajectoires des sources d'énergie sur les différents am_sub_workpiece associés à leur paramètres de fabrication (tranchage...). Ce module peut se décomposer en deux sous-modules : le premier (module A42 du diagramme SADT) qui permet d'obtenir un modèle tranché de la pièce et le second (module A43) qui permet de définir les trajectoires des outils. Ces deux informations sont ensuite assemblées et on obtient l'ensemble des trajectoires source d'énergie pour la fabrication additive.
- *Module de simulation* : Il retourne les informations des données STEP-NC sur la géométrie, les trajectoires outils... jusqu'à l'IHM pour visualisation. De plus d'autres développements pour l'optimisation et la simulation des procédés de fabrication additive pourront être introduits au niveau de ce module.

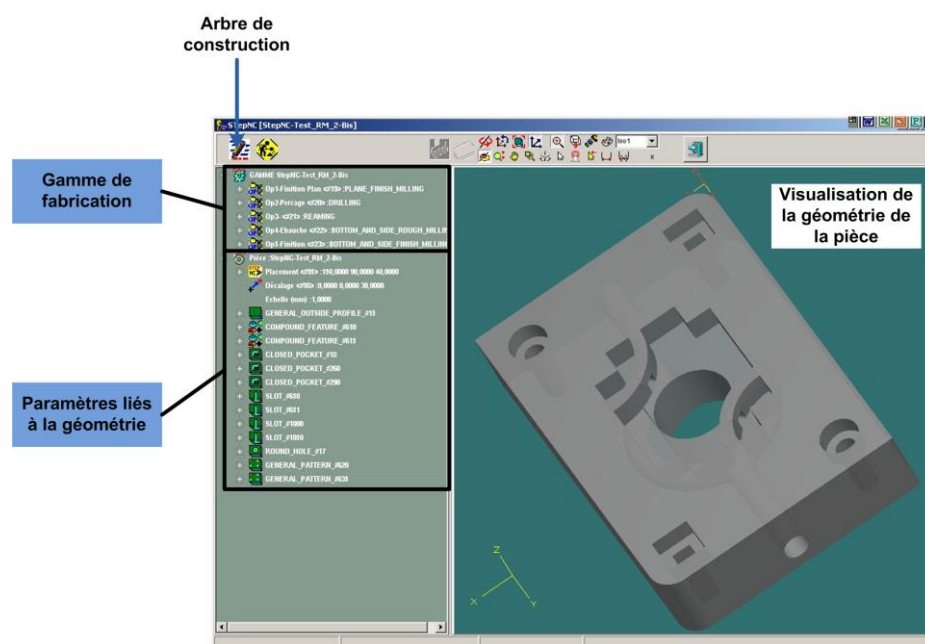


Figure 120 : Interface Homme/Machine de la plateforme SPAIM

4.2 Apports de la plateforme SPAIM

La plateforme SPAIM est intégrée dans une chaîne numérique STEP-NC complète. Le fichier STEP-NC est généré à partir de n'importe quel modèle CAO après traitement par le logiciel PosSFP-AM. Ce dernier après avoir reconnu les entités de fabrication permet à l'utilisateur de régler tous les paramètres du process (paramètres du laser, stratégies, choix des outils...), qui sont ensuite compilées dans un fichier STEP-NC. Ce fichier est ensuite envoyé vers la CN et traité par la plateforme SPAIM (Figure 121).

Une programmation interprétée rend possible l'utilisation du standard STEP-NC avec les machines de fabrication additive équipées de directeurs de commande numérique, qui comprennent pour l'instant le code-G. La plateforme SPAIM développée par notre équipe illustre bien cette situation (Figure 121). On retrouve avec cette intégration du standard STEP-NC, la plupart des avantages du format au niveau du directeur de commande numérique :

- 1) Un fichier STEP-NC peut être directement lu et exécuté sur une machine de fabrication additive sans modification particulière. Cette compatibilité est rendue possible par l'utilisation de données de haut niveau sur la géométrie de la pièce et des paramètres de fabrication, qui ne sont pas spécifiques à une machine en particulier. Toutes les informations sur la machine et le procédé sont fournies par la plateforme du DCN. Par exemple, l'exécution du même modèle STEP-NC sur des machines de fabrication additive différentes générera des trajectoires, des paramètres de fabrication différents, car chaque directeur de commande numérique utilisera les meilleurs paramètres de fabrication en fonction des équipements utilisés.
- 2) Des modifications sur la géométrie ou les paramètres de fabrication peuvent être effectuées directement au pied de la machine sur l'interface homme machine du DCN. Ces modifications conduisent directement à la régénération des trajectoires, de la géométrie et de l'arbre de construction du modèle STEP-NC. Le modèle STEP-NC ainsi que les modèles CAO et FAO sont mis à jour également.
- 3) Le retour d'informations depuis le DCN jusqu'aux logiciels de CAO et FAO est possible à partir des mises à jour du modèle STEP-NC. Des modifications peuvent être faites au pied de la machine pendant la fabrication de la première pièce. Ce retour d'information permet de capitaliser des informations en vue de la réalisation d'autres pièces et donc d'augmenter la qualité des futures pièces.
- 4) L'optimisation des paramètres de fabrication et des trajectoires est plus facile au niveau du DCN. La plateforme SPAIM offre donc de nouvelles possibilités d'optimisation du standard STEP-NC.
- 5) Le modèle STEP-NC a une taille relativement faible par rapport à d'autres standards du fait qu'il utilise des données de haut niveau conceptuel. Cela permet de réduire le temps d'échange des données et est, par conséquent, bien adapté pour de la fabrication collaborative au sein d'un réseau internet.

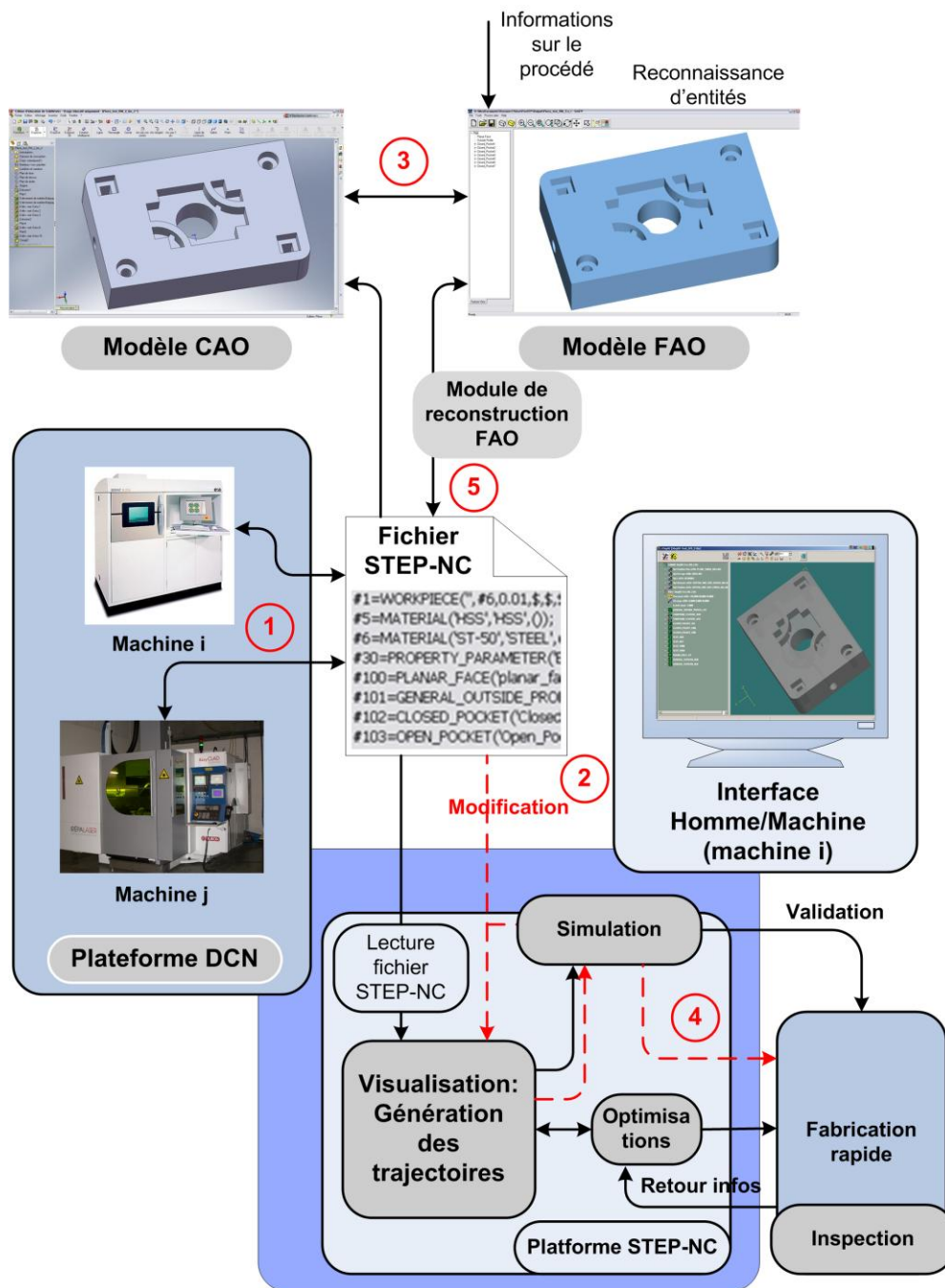


Figure 121 : Nouvelle chaîne numérique STEP-NC fabrication additive avec la plateforme SPAIM

4.3 Conclusion

4.3.1 Vers une programmation avancée des machines de fabrication additive

La plate-forme SPAIM offre aujourd'hui de nouvelles possibilités liées à la programmation STEP-NC. Les avantages du STEP-NC, outre ceux cités précédemment, se situent aussi au niveau des possibilités de simulation et d'optimisation au sein d'une commande numérique plus autonome et performante. SPAIM est ainsi destinée à intégrer les travaux de recherche menés dans ce domaine.

La plateforme SPAIM a initialement été développée pour l'usinage au niveau de l'équipe, et est intégrée sur une machine à structure parallèle du laboratoire (Verne conçue par Fatronik équipée d'une commande numérique Siemens 840D) [LAG09b] [RAU09b]. Ainsi, pour l'usinage différents travaux de recherche on été réalisés autour de la simulation ou de l'optimisation temps réel de l'usinage.

Ainsi, un module de simulation, basé sur les travaux existant de l'équipe [DUG03], permet de simuler l'avance réelle lors de l'usinage d'une pièce pour une première adaptation des paramètres d'usinage en vue de limiter les erreurs de poursuites. On pourra imaginer implémenter sur la plateforme SPAIM pour la fabrication additive d'autres modules de simulation qui seront développés à l'avenir.

De plus, de nouvelles possibilités s'offrent en vue de l'optimisation temps réel ou suite à la fabrication. Le concept ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing) [HAS06c] développé par l'équipe propose une méthode d'optimisation et d'adaptation des paramètres opératoires et des trajectoires outil en fonction des données disponibles dans la CN. En pratique, l'adaptation temps réel des paramètres d'usinage (par exemple l'avance) en fonction des efforts de coupe estimés au sein de la CN (calcul à partir des courants et puissances moteurs, du modèle géométrique de la machine, etc.) ont déjà montré de bons résultats. De même, la mesure de la pièce sur la machine peut permettre une régénération adaptative des trajectoires dans la CN. Si à l'avenir le même genre de travaux de recherche est effectué en fabrication additive, on peut imaginer l'implémenter sur la plateforme SPAIM.

Le développement de la plate-forme SPAIM amènera à l'intégration d'éventuels futurs modules dont les possibilités pourront être accrues au sein de l'interpréteur STEP-NC.

4.3.2 Nouveau concept de fabrication multi-process STEP-NC

Par ailleurs les travaux de l'équipe ne concernent pas uniquement les procédés de fabrication additive mais aussi les procédés d'usinage [LAG08] [LAG09b] [RAU09b] et le concept de fabrication multi-process STEP-NC [LAG09a] [LAG09c]. En effet, cette programmation de haut niveau peut permettre d'inclure et de rendre interopérables plusieurs procédés de fabrication. Un des objectifs de l'équipe est donc de parvenir à la réalisation d'une plateforme multi-process (Figure 122), avec un unique fichier STEP-NC indépendamment des procédés de fabrication utilisés. A terme, l'objectif est de disposer d'une plate-forme STEP-NC permettant d'inclure à la maquette numérique du produit la notion de supervision multi-process. Notre proposition d'avoir des sub_workpiece fabrication additive ou usinage au niveau du STEP-NC ouvre la voie d'un regroupement de l'ensemble des données de fabrication, quel que soit le procédé, au sein d'une même maquette numérique STEP-NC. En effet, les sub_workpiece peuvent être réalisés avec différents procédés de fabrication (usinage ou fabrication additive par exemple). Aujourd'hui, il existe une rupture nette entre chaque procédé, entraînant un cloisonnement des informations de fabrication d'un même produit. L'objectif de cette plateforme de supervision multi-process est de rendre interdépendants les différents choix de paramètres de fabrication liés aux procédés. Le STEP-NC offre aujourd'hui une réelle solution à travers la définition orientée objet des entités de fabrication (et notamment notre approche par sub_workpiece).

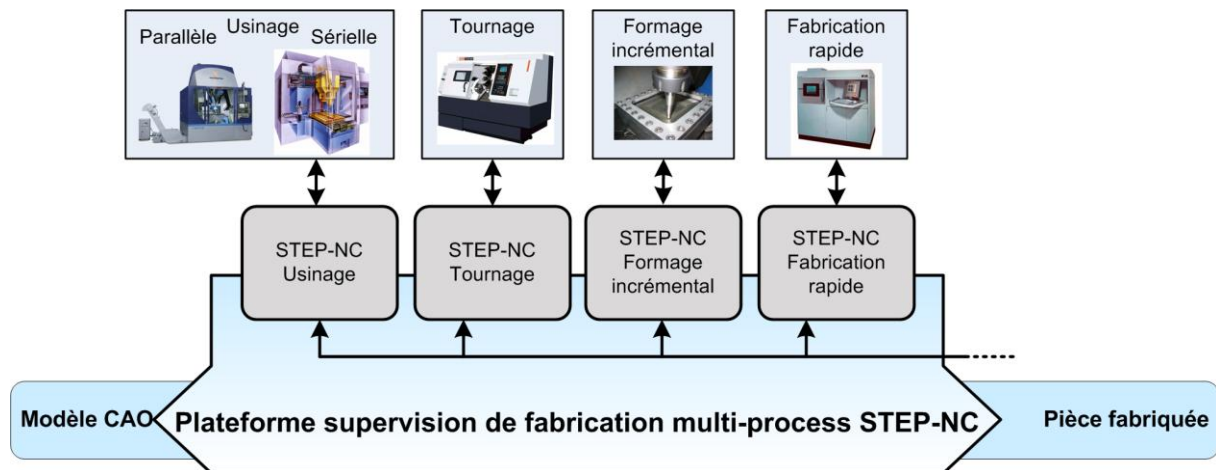


Figure 122 : Plateforme de supervision multi-process

5. Conclusion

Le format STEP-NC offre aujourd'hui un éventail de nouvelles possibilités et avancées, tant au niveau de la programmation de la fabrication additive que de l'intégration d'autres procédés de fabrication.

Ce chapitre a été pour nous l'occasion de présenter, pour la fabrication additive, une nouvelle solution d'intégration de la programmation STEP-NC interprétée à travers la plateforme SPAIM (STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing) implémenté au sein de la commande numérique des machines de fabrication additive. Cette plate-forme permet la lecture et l'exécution d'un fichier STEP-NC sur n'importe quelle commande numérique générique. À partir des informations orientées objet du fichier STEP-NC, elle génère automatiquement les trajectoires et permet des modifications pied machine de la géométrie des entités et des données process. Le feed-back de ces modifications au sein du fichier STEP-NC est alors possible en direction de la CAO/FAO. Des modules de simulation et d'optimisation permettront à la plate-forme SPAIM d'appuyer les avantages liés à la programmation STEP-NC.

Cette plateforme permet également la supervision pour la fabrication multiprocess qui ouvre une voie peu explorée pour l'intégration complète de la fabrication dans la chaîne numérique.

Chapitre 6

Conclusions et Perspectives

1. Synthèse des travaux effectués

Les premières analyses réalisées au cours de nos travaux concernent le contexte général de notre étude.

Nos travaux se situent évidemment en accord avec la situation actuelle de l'industrie des produits manufacturés. Les changements importants intervenus au niveau de l'industrie entraînent un ensemble de contraintes à respecter pour les entreprises manufacturières que l'on peut résumer par cinq objectifs principaux qu'il faut respecter : coût, délai, qualité, flexibilité et impact environnemental. Pour maîtriser au mieux ces cinq objectifs, les acteurs de l'industrie manufacturière doivent aujourd'hui faire appel à toutes les technologies mises à leur disposition, tant en terme de procédés de fabrication qu'en terme de solutions numériques.

Toutes ces contraintes de plus en plus pesantes sur l'industrie manufacturière ont donc nécessité de faire évoluer les comportements. Ainsi, les entreprises exerçant leurs activités dans des domaines hautement compétitifs (tels que l'automobile ou l'aérospatial) doivent de plus en plus pouvoir former des partenariats et réseaux avec des sous-traitants. Tous ces acteurs doivent donc augmenter leur flexibilité et avoir une réaction quant aux attentes des clients et/ou donneurs d'ordre. C'est pourquoi, elles ont désormais besoin de faire partie intégrante d'un réseau numérique incluant toutes les phases de vie du produit développé. Elles doivent donc résoudre le problème de l'intégration, de l'échange, et de l'archivage à long terme des données techniques qui constituent leur patrimoine informationnel.

L'environnement numérique de la fabrication par enlèvement de matière a mis plusieurs dizaines d'années pour atteindre un ensemble cohérent et performant. Les procédés très jeunes, que sont les procédés de fabrication additive, ne peuvent se permettre d'attendre le même délai dans le contexte international actuel, s'ils veulent perdurer. De nouvelles propositions doivent donc être faites pour augmenter les performances de la chaîne numérique des procédés de fabrication par ajout de matière, pour être des concurrents intéressants aux procédés de fabrication plus traditionnels.

Le développement de ces procédés est aujourd'hui ralenti par l'utilisation d'une chaîne numérique pauvre en informations et non adaptée à ce challenge. Leur environnement numérique est un frein, alors que c'est aujourd'hui un enjeu majeur pour la réduction des coûts, des temps de développement, l'augmentation de la flexibilité et de la qualité des produits. Par ailleurs, leur chaîne numérique n'est pas en phase avec le niveau de performance des solutions CAO-FAO-DCN et logiciels de simulation / optimisation de plus en plus performants.

Nos travaux se sont portés sur la recherche de solutions pour arriver à un environnement numérique pour les procédés de fabrication additive qui soit performant. Nous avons donc proposé une méthodologie dans ce but pour obtenir une chaîne numérique standardisée et performante.

Afin de proposer un nouveau modèle de chaîne numérique pour la fabrication par ajout de matière, nous nous sommes intéressés aux solutions déjà proposées en fabrications additives et celles déjà développées au niveau d'autres procédés de fabrication.

Cette étude nous a permis de constater que plusieurs solutions avaient déjà été proposées en fabrication additive pour remplacer le format utilisé actuellement. Malheureusement bon nombre de ces propositions se sont avérées être infructueuses. En effet, certaines propositions ne proposaient de résoudre qu'une partie des problèmes sans adopter une vision globale, d'autres se sont au final avérées être beaucoup trop compliquées à utiliser et/ou mettre en place. Plus, récemment une partie non négligeable de la communauté s'est penchée sur cette problématique et veut arriver à la proposition du STL 2.0. Un standard qui soit bien adapté aux procédés de fabrication additive actuels, et qui soit adopté rapidement par toute la communauté. Comme nous l'avons vu, si ce format semble être intéressant, un certain nombre d'interrogations subsistent quant à l'obtention d'une chaîne numérique globale performante. De plus, ce format est uniquement développé pour les procédés de fabrication additive et risque donc de marginaliser ces procédés.

Par ailleurs, l'utilisation d'un format avec une programmation basée entités, semble donner des résultats intéressants au niveau de la chaîne numérique. Cela nous a conduit à nous intéresser de plus près à ce type de format. Notre étude bibliographique nous a permis d'établir que le format STEP-NC était aujourd'hui le standard avec une programmation basée entité qui est le plus évolué, avec notamment des résultats probants au niveau de l'usinage. Nous avons donc proposé de baser notre proposition de chaîne numérique pour les procédés de fabrication additive sur ce format.

Dans un premier temps, nous avons défini un nouveau modèle hiérarchisé des données d'un projet de fabrication additive en sept étapes. Ce modèle s'appuie sur une description basée-entités. Cette structure basée-entités présente plusieurs avantages : tout d'abord de pouvoir facilement hiérarchiser les informations les unes par rapport aux autres, et ensuite de pouvoir enrichir le modèle avec de nouvelles entités sans pour autant remettre en cause le modèle dans sa globalité. De plus, la réalisation d'un modèle basée-entités facilitera l'intégration de ce modèle dans un standard de données dont la programmation est basée-entités.

A la suite de ce modèle hiérarchisé des données numériques, nous avons proposé l'intégration de ce modèle dans la structure de la norme STEP-NC (ISO 14649). Le modèle que nous proposons est un modèle générique, qui est indépendant des logiciels de CFAO ou des DCN utilisés. Un avantage est d'avoir une préparation de la fabrication qui soit générique et non plus dédiée à un seul type de machine. De plus le modèle ISO 14649 est un modèle interopérable qui permet son intégration sur différents logiciels de CFAO. Le modèle ISO 14649 fabrication additive permet également d'avoir une portabilité du programme STEP-NC sur toutes les machines de fabrication additive équipées d'un DCN générique. Cela permet d'avoir le même modèle indépendamment de la machine de fabrication additive choisie. La conservation de données de haut niveau conceptuel au niveau des directeurs de commande numérique permet également d'introduire de l'intelligence au niveau de la machine, avec la constitution d'une base de données et la capitalisation des données au niveau du modèle STEP-NC.

Finalement, la plateforme SPAIM développée au sein de l'équipe de recherche, nous a permis de valider le modèle STEP-NC que nous avons mis en place. Cette plateforme sert également de démonstrateur pour montrer les possibilités mises en jeux par notre modèle STEP-NC. Par ailleurs, sa programmation interprétée permet une rapide diffusion sur des machines de fabrication additive équipées de directeurs de commande numérique génériques.

2. Conclusions : les apports de notre travail

Dans cette partie du manuscrit, nous présentons tous les apports de notre travail suivant deux points majeurs : d'une part la modélisation des informations composant un projet de fabrication additive et d'autre part l'intégration de ce modèle dans une nouvelle chaîne numérique STEP-NC.

Notre première conclusion concerne le modèle de description générique d'un projet de fabrication additive.

Le modèle hiérarchisé des données que nous avons proposé est un modèle générique qui modélise toutes les étapes qui doivent être définies lors de la réalisation d'un projet de fabrication additive. Ce modèle que nous proposons est composé de sept étapes hiérarchisées les unes par rapport aux autres et qui adopte une structure qui définit également les interactions entre les différentes étapes du modèle. De plus, notre modèle se veut exhaustif quant aux informations qu'il est nécessaire de définir lors d'un projet de fabrication additive. Par ailleurs, ce modèle est complètement indépendant de tout standard de données et s'appuie sur une description basée-entités. Cette structure basée-entités présente plusieurs avantages : tout d'abord de pouvoir facilement hiérarchiser les informations les unes par rapport aux autres, et ensuite de pouvoir enrichir le modèle avec de nouvelles entités sans pour autant remettre en cause le modèle dans sa globalité. De plus, la réalisation d'un modèle basée-entités facilitera l'intégration de ce modèle dans un standard de données dont la programmation est basée-entités.

Ce modèle est générique et peut s'intégrer parfaitement dans un standard de données pour obtenir une chaîne numérique complète. Le fait pour notre modèle d'être générique ne le rend pas dépendant de solutions propriétaires contrairement aux chaînes numériques généralement utilisées en fabrication additive. Une fois intégré dans un standard de données cela permettra d'utiliser des solutions génériques au niveau des logiciels de CFAO et du directeur de commande numérique. Ces changements majeurs permettront d'utiliser des moyens numériques plus adaptés à la fabrication additive et donc d'augmenter les performances de ces procédés.

Notre seconde conclusion concerne l'intégration de notre modèle hiérarchisé dans un standard de données et son application dans une chaîne numérique complète.

Le format STEP-NC est un format intéressant qui s'appuie sur une programmation basée-entités. C'est actuellement le format basé-entités en fabrication qui est le plus abouti. Cette programmation étant intéressante, nous avons donc proposé dans nos travaux un nouveau modèle STEP-NC pour les procédés de fabrication par ajout de matière.

Le modèle STEP-NC est un modèle unique qui est basé au cœur de la chaîne numérique. Celui-ci est enrichi à chaque étape de la chaîne numérique de fabrication additive. Cette configuration présente l'avantage d'avoir un unique modèle et donc d'éviter la multiplication des fichiers, la conversion de fichiers, l'utilisation de post-processeurs... et donc d'éventuelles pertes de données ou redondances dans les informations.

Le format STEP-NC offre aujourd'hui un éventail de nouvelles possibilités et avancées, tant au niveau de la programmation de la fabrication additive que de l'intégration d'autres procédés de fabrication :

- *Meilleure maîtrise du procédé* : possibilité de développements et contrôles de nouvelles stratégies, trajectoires... Meilleur réglage des paramètres de fabrication avec l'intégration dans la chaîne numérique d'une solution FAO robuste.
- *Flux de données bidirectionnels* : définition d'une chaîne numérique aux flux de données bidirectionnels pour augmenter l'échange de données entre la CAO-FAO-DCN.
- *Simulation* : intégration de modules de simulation, qui peuvent par exemple détecter les collisions ou simuler les trajectoires des sources d'énergie (laser, EBM...).
- *Suivi de fabrication* : définition et développement d'une solution au niveau du DCN pour le suivi et le contrôle du procédé, des outils et de la pièce. Ce genre de solution permet l'inspection du procédé en cours de fabrication et la compensation des erreurs de fabrication.
- *Optimisation du procédé* : optimisation du procédé de fabrication additive en utilisant le retour d'information au niveau du DCN.
- *Adaptabilité* : ce type de DCN plus ouvert déjà utilisé sur les machines d'usinage peut facilement être installé sur des machines de fabrication rapide de nouvelle génération.
- *Interopérabilité et portabilité* : meilleur échange des données entre les différents acteurs de la chaîne numérique, et possibilité de changement de machine de fabrication additive sans retraitement des données de conception et fabrication.
- *Multi-procédé* : ce type de chaîne numérique avec l'utilisation de DCN ouvert n'est pas dédié à l'utilisation d'un seul procédé, et son utilisation pour la réalisation de pièces multi-procédés peut être envisagé.

Le chapitre 5 a été pour nous l'occasion de présenter, pour la fabrication additive, une nouvelle solution d'intégration de la programmation STEP-NC interprétée à travers la plate-forme SPAIM (STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing) implémenté au sein de la commande numérique des machines de fabrication additive. Cette plate-forme permet la lecture et l'exécution d'un fichier STEP-NC sur n'importe quelle commande numérique générique. À partir des informations orientées objet du fichier STEP-NC, elle génère automatiquement les trajectoires et permet des modifications pied machine de la géométrie des entités et des données process. Le feed-back de ces modifications au sein du fichier STEP-NC est alors possible en direction de la CAO/FAO. Des modules de simulation et d'optimisation permettront à la plate-forme SPAIM d'appuyer les avantages liés à la programmation STEP-NC.

Cette plateforme permet également la supervision pour la fabrication multiprocess qui ouvre une voie peu explorée pour l'intégration complète de la fabrication dans la chaîne numérique.

Cependant, tous les verrous n'ont pas été levés, les perspectives découlant de ce travail sont donc de plusieurs ordres. Ces perspectives sont présentées dans la partie suivante de ce chapitre.

3. Perspectives

Comme pour la conclusion, nous allons aborder les perspectives de nos travaux, suivant les deux points : le modèle hiérarchisé d'un projet de fabrication additive et l'intégration de ce modèle dans une chaîne numérique STEP-NC.

Pour ce qui est du modèle hiérarchisé des données d'un projet de fabrication par ajout de matière, nous avons défini toutes les étapes et données nécessaires pour réaliser une pièce en fabrication additive.

Notre modèle ne concerne aujourd'hui que les procédés de fabrication par ajout de matière. Or, aujourd'hui de plus en plus de projets de fabrication nécessitent l'utilisation de plusieurs procédés pour arriver à la réalisation de pièces fonctionnelles. L'enjeu devient donc plus important avec l'utilisation optimale de chaque procédé de fabrication. Aucun modèle de description de tels projets de fabrication n'a été développé dans la littérature. La structure du modèle en sept étapes que nous avons proposé peut être conservée pour tous les projets de fabrication. Les contraintes liées à la réalisation de pièces multi-procédés, peuvent être intégrées à cette structure pour arriver à la définition d'un nouveau modèle multi-procédés (fabrication additive, usinage, formage incrémental) sur machine à commande numérique.

En ce qui concerne l'intégration de ce modèle dans une nouvelle chaîne numérique STEP-NC, plusieurs points ont été abordés dans nos travaux : tout d'abord la proposition d'un nouveau modèle STEP-NC pour la fabrication additive, puis la proposition d'une plateforme de démonstration pour valider notre modèle.

Le modèle que nous avons présenté dans ce manuscrit a été présenté à plusieurs reprises au comité de l'ISO TC 184/SC1. Ce n'est pas encore la version définitive de la norme. Plusieurs points nécessitent d'être encore développés. Ainsi, si les principaux types d'information qui doivent figurer dans la norme ont été définis, nous n'avons pas toujours été exhaustifs au niveau des informations à intégrer dans la norme : nouvelles entités de fabrication additive, différentes stratégies de fabrication additive (notamment 5 axes), sources d'énergie pour transformer la matière par exemple. Une fois ces différentes informations définies au niveau du modèle STEP-NC, le modèle pourra être soumis au comité ISO pour être défini comme version finale (Final Draft) et être incorporé officiellement dans la norme ISO 14649.

Comme nous l'avons déjà évoqué, pour être de plus en plus compétitif pour la réalisation de pièces fonctionnelles, il est important d'utiliser un procédé de fabrication pour les opérations pour lesquelles il est le plus performant. Cela conduit désormais à la réalisation de pièces faisant appel à plusieurs procédés de fabrication. Ainsi, on peut réaliser des pièces qui sont réalisées en fabrication par ajout de matière associée à de l'usinage (fraisage, tournage...). La norme ISO 14649 est organisée pour le moment de telle sorte que l'on distingue les différents procédés de fabrication dans sa structure. Chaque procédé de fabrication a sa propre part au niveau de la norme : part 11 (fraisage), part 12 (tournage), parts 13 et 14 (électroérosion) et part 17 (fabrication additive). Il devient donc aujourd'hui

nécessaire de proposer au niveau de la norme ISO 14649, une structure qui permette de mieux définir la fabrication multi-procédés en prenant en compte la particularité de chaque procédé (au niveau des différentes parts), mais aussi en prenant en compte leur interaction.

Par ailleurs comme nous l'avons vu, le modèle STEP-NC que nous proposons s'appuie sur des entités de fabrication. Pour le moment les entités utilisées en usinage sont celles de l'AP-224. Cette situation n'est pas satisfaisante, la reconnaissance d'entités automatique n'étant pas toujours performante et les entités de l'AP-224 pas forcément adaptées aux opérations de fabrication additive. Une solution serait donc que le concepteur ou le fabricant définisse lui-même ses propres entités de fabrication (comme ce qui est fait dans le modèle STL 2.0). Les entités choisies par le concepteur peuvent être issues de méthodes de conception développées pour la fabrication additive et notamment les travaux initiés par l'équipe au niveau de Design for Rapid Manufacturing (DFRM). Cette solution éviterait d'avoir à définir de nouvelles entités de fabrication additive, et permettrait de s'affranchir des entités de l'AP-224, qui sont un frein au développement des différents modèles STEP-NC. Ainsi, les entités de fabrication définies seraient mieux adaptées à la fabrication réalisée ensuite.

L'utilisation du STEP-NC, au niveau des directeurs de commande numérique des machines de fabrication additive, permet également de développer de nouvelles approches de programmation. Ainsi, on peut avec ce standard employer ces machines évoluées de façon optimale, en adaptant leur comportement aux contraintes associées au procédé de fabrication utilisé. Ainsi des travaux pourront être conduits pour le développement de modules de génération de trajectoires pour les procédés de projection de poudre. Ainsi l'un des objectifs pourra être la proposition de parcours laser qui partant de géométries et paramétrages génériques, pourront être modifiés en fonction des contraintes de fabrication et des spécificités de la machine employée. L'utilisation du format STEP-NC permet également d'adapter les trajectoires des sources d'énergie aux spécificités de chaque machine et non plus d'avoir des trajectoires génériques pour toutes les machines. Ces différentes trajectoires des sources d'énergie pourront ensuite être intégrées dans la norme ISO 14649 et validée sur la plateforme SPAIM implémentée sur la machine CLAD du laboratoire.

Enfin, nous avons proposé une plateforme STEP-NC pour la fabrication additive (SPAIM) implémentée sur la machine CLAD de l'IRCCyN. Nous avons pour le moment présenté les nouvelles possibilités de cette plateforme pour la fabrication additive. La prochaine étape est désormais la réalisation de pièces physiques avec le procédé CLAD.

De même, la gestion de données de haut niveau conceptuel au niveau du directeur de commande numérique permet d'avoir plus d'intelligence au niveau de la machine et donc d'intégrer des modules d'optimisation et de simulation de la fabrication. Le développement de la plate-forme SPAIM pour la fabrication additive amènera à l'intégration d'éventuels futurs modules dont les possibilités pourront être accrues au sein de l'interpréteur STEP-NC. De plus, cette programmation de haut niveau peut permettre d'inclure et de rendre interopérables plusieurs procédés de fabrication. Un des objectifs de l'équipe est donc de

parvenir à la réalisation d'une plateforme multi-process avec un unique fichier STEP-NC indépendamment des procédés de fabrication utilisés. A terme, l'objectif est de disposer d'une plate-forme STEP-NC permettant d'inclure à la maquette numérique du produit la notion de supervision multi-process.

Références Bibliographiques

- [ADA03] Adamczyk, Z., Jon´czyk, D., Kociolek, K., A new approach to a CAD/CAM system as a part of distributed environment: Intranet database, *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, Vol. 133, pp. 7-12.
- [AHN07] Ahn, D., Kim, H., Lee, S., Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing. *International journal of machine tools & manufacture*. 2007, Vol. 47, pp. 593-606.
- [ALE98] Alexander, P., Allen, S., Dutta, D., Part orientation and build cost determination in layered manufacturing. *Computer-Aided Design*. 1998, Vol. 30, pp. 343-356.
- [ALV06] Alvares, A.J., Ferreira, J.C.E., WebTurning: Teleoperation of a CNC turning center through the Internet. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, Vol. 179, pp. 251-259.
- [ALV08a] Alvares, A.J., Ferreira, J.C.E., Lorenzo, R.M., An integrated web-based CAD/CAPP/CAM system for the remote design and manufacture of feature-based cylindrical parts. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2008, Vol. 19, pp. 643-659.
- [ALV08b] Alvares, A.J., Ferreira, J.C.E., A system for the design and manufacture of feature-based parts through the Internet. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008, Vol. 35, pp. 646-664.
- [ARB82] Arbab, F., Requirements and architecture of CAM-Oriented CAD systems for design and manufacture of mechanical parts. Ph.D. Thesis, 1982.
- [ARM08] Armillotta, A., Selection of layered manufacturing techniques by an adaptive AHP decision model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2008, Vol. 24, pp. 450-461.
- [AST] ASTM international F42 committee, <http://www.astm.org/COMMIT/COMMITTEE/F42.htm>, consulté le 04/03/2010.
- [BAL08] Ball, A., Ding, L., Patel, M., An approach to accessing product data across system and software revisions, *Advanced Engineering Informatics*. 2008, Vol. 22, pp. 222-235.
- [BHA00] Bhandarkar, M.P., Downie, B., Hardwick, M., Nagi, R., Migrating from IGES to STEP: one to one translation of IGES drawing to STEP drafting data, *Computers in Industry*. 2000, Vol. 41, pp. 261-277.
- [BIN04] Li Bin, L., Yun-fei, Z Xiao-qi, T., A research on open CNC system based on architecture/component software reuse technology, *Computers in Industry*. 2004, Vol. 55, pp. 73-85.
- [BLA92] Blather, J.E. US Patent 473,901, 1892.
- [BOI07] Boisselier, D., Sankare, S., Gauffillet, J.P., Rechargement laser et fabrication rapide - Performances – Applications. *Journées nationales du club laser et procédés*, Limoges (France), 2007.

- [BON08] Bonnard, R., Mognol, P., Hascoët, J.Y., Rapid Prototyping Project Description in STEP-NC Model, *6th CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*. 2008, Naples (Italy), pp. 357-362.
- [BON09] Bonnard, R., Mognol, P., Hascoët, J.-Y., Integration of rapid manufacturing processes in a high level numerical chain. *4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*. Leiria (Portugal), 2009, pp. 595-601.
- [BON10] Bonnard, R., Mognol, P., Hascoët, J.-Y., A new digital chain for Additive Manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*. 2010, Vol. 5 n°2, pp. 75-88.
- [BOU95a] Bouazza, M., *La norme STEP*, Hermès, Paris, 1995.
- [BOU95b] Bouazza, M., *Le langage EXPRESS*, Hermès, Paris, 1995.
- [BUS08] Buswel, R.A., Thorpe, A., Soar, R.C., Gibb, A.G.F., Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction, *Automation in Construction*. 2008, Vol. 17, pp. 923-929.
- [BYU05] Byun, H.S., Lee, K.H., A decision support system for the selection of a rapid prototyping process using the modified TOPSIS method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005, Vol. 26, pp. 1338-1347.
- [CAM94] Campbell, R.I., Dickens, P.M., Rapid prototyping: a global view. *In proceedings of SFF Symposium*, University of Texas. 1994, pp. 110-117.
- [CAM96] Campbell, R.I., Bernie, M.R.N., Creating a database of Rapid Prototyping system capabilities. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996, Vol. 61, pp. 163-167.
- [CAR94] Carleberg, C., Product model driven direct manufacturing, *In proceedings of SFF Symposium*, University of Texas. 1994, pp. 270-276.
- [CHE07] Chen, K.Z., Feng, X.F., Wang, F. A virtual manufacturing system for components made of a multiphase perfect material. *Computer-Aided Design*, 2007, vol. 39, p. 112-124.
- [CHO02] Choi, S.H., Samavedam, S., Modelling and optimization of Rapid Prototyping. *Computers in Industry*. 2002, Vol. 47, pp. 39-53.
- [CHO03] Choi S.H., Chan A.M.M., A layer-based virtual prototyping system for product development. *Computers in Industry*. 2003, Vol. 51, pp. 237-256.
- [CHO04] Choi, S.H., Chan, A.M.M., A virtual prototyping system for rapid product development. *Computer-Aided Design*. 2004, Vol. 36, pp. 401-412.
- [CHO05] Choi, S.H., Cheung, H.H., A multi-material virtual prototyping system. *Computer-Aided Design*. 2005, Vol. 37, pp. 123-136.
- [CHU97a] Chua, C.K., Gan, G.K.J., Tong, M., Interface between CAD and rapid prototyping systems. Part 1: a study of existing interfaces. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 1997, Vol. 13, pp. 566-570.
- [CHU97b] Chua, C.K., Gan, G.K.J., Tong, M., Interface between CAD and rapid prototyping systems. Part 2: LMI – an improved interface. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 1997, Vol. 13, pp. 571-576.
- [CHU98] Chua, C.K., Chou, S.M., Wong, T.S., A study of the state of the art rapid prototyping technologies. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 1998, Vol. 14, pp. 146-152.

- [CHU98] Chua, C.K., Chou, S.M., Wong, T.S., A study of the state of the art rapid prototyping technologies. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 1998, Vol. 14, pp. 146-152.
- [CIR10] Site internet du CIRTES. Disponible sur <http://www.cirtes.com/>, consulté le 19/01/10.
- [COS06] Costa Santos, E., Shiomi, M., Osakada, K., Laoui, T., Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006, Vol. 46, pp. 1459-1468.
- [CUL07] Culler, D.E., Burd, W., A framework for extending computer aided process planning to include business activities and computer aided design and manufacturing (CAD/CAM) data retrieval, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2007, Vol. 23, pp. 339-350.
- [DAN08] Danjou, S., Bridging the gap between CAD and Rapid technologies – Exigency of standardized data exchange. *12th European forum on rapid prototyping*. 2008, Châtenay-Malabry (France).
- [DIN04] Ding, Y., Lan, H., Hong, J., Wu, D., An integrated manufacturing system for rapid tooling based on rapid prototyping. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2004, Vol. 20, pp. 281-288.
- [DUG03] Dugas, A., Lee, J.J., Terrier, M., Hascoet, J.-Y., Development of a machining simulator considering machine behavior. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2003, Vol. 217, pp.1333-1339.
- [ELK02] El Khalkhali, I., Système intégré pour la modélisation, l'échange et le partage des données de produit. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002, 149 p.
- [ESP00] ESPRIT, Newsletter issue 2, 2000, www.step-nc.org.
- [FEE03] Feeney, A.B., Kramer, T.R., Proctor, F., Hardwick, M., Loffredo, D., STEP-NC Implementation - ARM or AIM? *ISO TC184/SC4 WG3 N1223*, 2003.
- [FOR04] Fortin, E., Chatelain, J.-F., Rivest, L., An innovative software architecture to improve information flow from CAM to CNC, *Computers & Industrial Engineering*. 2004, Vol. 46, pp. 655-667.
- [GAM90] Groupe GAMA. La gamme automatique en usinage. Hermes, 1990.
- [GAN99] Gan, G.K.J., Chua, C.K., Mei, T., Development of a new rapid prototyping interface. *Computers in Industry*. 1999, Vol. 39, pp. 61-70.
- [GIL95] Gilman, C.R., Rock, S.J., The use of STEP to integrate design and solid freeform fabrication, *In proceedings of SFF Symposium*, University of Texas. 1995, pp 213-220.
- [HAB 93] Habrias, H., *Introduction à la spécification*, Editions Masson, ISBN: 2-225-82768-0, 1993.
- [HAG09] Hague R., Additive Manufacturing a low carbon footprint: results from the ATKINS project. *4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Leiria (Portugal), 2009.

-
- [HAI03] Haipeng, P., Tianrui, Z., Generation and optimization of slice profile data in rapid prototyping and manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, Vol. 187-188, pp. 623-626.
- [HAS06a] Hascoët, J.-Y., Mognol, P., Rivette, M., STEP-NC applications for rapid prototyping. *49th ISO TC184/SC1 meeting, Future of Step for manufacturing activities*, Toulouse (France), 2006.
- [HAS06b] Hascoët, J.-Y., Mognol, P., Rivette, M., STEP-NC applications for rapid prototyping. *50th ISO TC184/SC1 meeting, Future of Step for manufacturing activities*, Hershey (USA), 2006.
- [HAS06c] Hascoët, J.-Y., Rauch, M., A generic method for real time adaptative force control in manufacturing operations using CNC data. *International conference on High Speed milling*. San Sebastian (Espagne), 2006.
- [HAS08] Hascoët, J.-Y., Bonnard, R., Mognol, P., Rapid Manufacturing Project Description in STEP-NC Model. *56th ISO TC184/SC1 meetings, Industry Day: Future of STEP for Manufacturing activities*. 2008, Busan (Korea).
- [HIL09] Hiller, J.D., Lipson, H., STL 2.0: a proposal for a universal multi-material Additive Manufacturing File format. *In proceedings of SFF Symposium*. 2009, University of Texas (USA).
- [HON03] Hongjun, L., Zitian, F., Naiyu, H., Xuanpu, D., A note on rapid manufacturing process of metallic parts based on SLS plastic prototype. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, Vol. 142, pp. 710-713.
- [HU02] Hu, Z., Lee, K., Hur, J., Determination of optimal build orientation for hybrid rapid-prototyping. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, Vol. 130-131, pp. 378-383.
- [HU03] Hu, D., Kovacevic, R., Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2003, Vol. 43, pp. 51-60.
- [HU08] Hu, S.J., Zhu, X., Wang, H. Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57, pp. 45-48.
- [HU09] Hu, T., Zhang, C Liu, R., Li, P., Design and implementation of an open CNC core at the shop floor level. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009, Vol. 40, pp. 541-552.
- [IGE80] IGES, Initial Graphics Exchange Specification: ANSI Y 14.26M, ANSI – American National Standard Institute, USA, 1980.
- [ISO82] ISO 6983, *International Standard Organization. Numerical control of machines – Program format and definition of address words*, 1982.
- [ISO94a] ISO 10303 - *Industrial automation systems and integration, product data representation and exchange*, 1994.
- [ISO94b] ISO 10303-11 - *Industrial automation systems: and integration – Product data representation and exchange – Part 11: Description Methods: The EXPRESS language reference manual*, 1994.
- [ISO94c] ISO 10303-203 - *Industrial Automation Systems and Integration— Product Data Representation and Exchange, Part 203. Application protocol:*
-

- configuration controlled 3D designs of mechanical parts and assemblies, 1994.
- [ISO01] ISO 10303-224 - Systèmes d'automatisation industrielle et intégration – Représentation et échange de données de produits – Partie 224: Protocole d'application: Définition de produits mécaniques pour la planification de procédés utilisant des caractéristiques d'usinage, 2001.
- [ISO02] ISO 10303-21 - Systèmes d'automatisation industrielle et intégration – Représentation et échange de données de produits – Partie 21: Méthodes de mise en application: Encodage en texte clair des fichiers d'échange, 2002.
- [ISO03a] ISO 14649-1 - Système d'automatisation industrielle et intégration – Commande des dispositifs physiques – Modèles de données pour les contrôleurs numériques informatisés – partie 1 : aperçu et principes fondamentaux, ISO TC 184/SC1, 2004.
- [ISO03b] ISO 10303-214 - Systèmes d'automatisation industrielle et intégration – Représentation et échange de données de produits – Partie 214: Protocole d'application: Données de base pour la construction automobile, 2003.
- [ISO04a] ISO 14649-10 - Système d'automatisation industrielle et intégration – Commande des dispositifs physiques – Modèles de données pour les contrôleurs numériques informatisés – partie 10 : données des procédés généraux, ISO TC 184/SC1, 2004.
- [ISO04b] ISO 14649-11 - Système d'automatisation industrielle et intégration – Commande des dispositifs physiques – Modèles de données pour les contrôleurs numériques informatisés – partie 11 : données des procédés relatifs au fraisage, ISO TC 184/SC1, 2004.
- [ISO04c] ISO 14649-12 - Système d'automatisation industrielle et intégration – Commande des dispositifs physiques – Modèles de données pour les contrôleurs numériques informatisés – partie 12 : données des procédés relatifs au tournage, ISO TC 184/SC1, 2004.
- [ISO04d] ISO 14649-13 - Système d'automatisation industrielle et intégration – Commande des dispositifs physiques – Modèles de données pour les contrôleurs numériques informatisés – partie 13 : données des procédés relatifs à l'électroérosion, ISO TC 184/SC1, 2004.
- [ISO04e] ISO 14649-14 - Système d'automatisation industrielle et intégration – Commande des dispositifs physiques – Modèles de données pour les contrôleurs numériques informatisés – partie 14 : données des procédés relatifs à l'électroérosion, ISO TC 184/SC1, 2004.
- [ISO07] ISO-10303-238, Norme ISO 10303-238 : Systèmes d'automatisation industrielle et intégration. Représentation et échange de données de produits. Partie 238: Protocole d'application : Modèle d'application interprété pour les directeurs de commande numérique, ISO TC 184/SC4/WG3 N1534, 2007.
- [JAC99] Jacobson, I., Booch, G, Rumbaugh, J., *The Unified Software Development Process*, Addison-Wesley Eds, 1999.

- [JAH10] Jahangirian, M., Eldabi, T., Naseer, A., Stergioulas, L.K., Young, T., Simulation in manufacturing and business: A review, *European Journal of Operational Research*. 2010, Vol. 203, pp. 1-13.
- [JEE96] Jee, H.S., Sriram, R.D., Pratt, M.J., Workshop handouts for STEP based solid interchange format, National *Institute of Standards and Technology*. 1996, Disponible à l'adresse: rapid.lpt.fi/archives/rp-ml-1996/532.html.
- [JEE99] Jee, H.S., Lee, B.Y, Slicing STEP-based CAD models for CAD/RP interface, *In proceedings of SFF Symposium*, University of Texas. 1999, pp. 171-178.
- [JUR99] Jurrens, K.K., Standards for the rapid prototyping industry, *Rapid Prototyping Journal*. 1999, Vol. 5 n°4, pp. 169-178.
- [KER09a] Kerninon, J., Mognol, P., Hascoët, J.-Y., Global approach to design and manufacture Direct Parts. *4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*. Leiria (Portugal), 2009, pp.111-116.
- [KER09b] Kerbrat, O., Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides basée sur l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication. Thèse de doctorat École Centrale de Nantes, 2009, 211 p.
- [KER10] Kerbrat, O., Mognol, P., Hascoët, J.-Y., Manufacturability analysis for hybrid modular tool. *Rapid Prototyping Journal*. 2010, Vol. 10 n°1, pp. 63-72.
- [KIM05] Kim, H.-C., Lee, S.-H., Reduction of post-processing for stereolithography systems by fabrication-direction optimization. *Computer-Aided Design*. 2005, Vol. 37, pp. 711-725.
- [KOC99] Kochan, D., Kai, C.C., Zhaohui, D., Rapid prototyping issues in the 21st century. *Computers in Industry*. 1999, Vol. 39, pp. 3-10.
- [KRU98] Kruth, J.-P., Leu, M.C., Nakagawa, T., Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1998, Vol. 47, Issue 2, pp. 525-540.
- [KRU03] Kruth, J.P., Froyen, L., Rombouts, M., Van Vaerenbergh, J., Mercells, P., New Ferro Powder for Selective Laser Sintering of Dense Parts, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2003, Vol. 52, Issue 1, pp. 139-142.
- [KRU04] Kruth, J.P., Froyen, L., Van Vaerenbergh, J., Mercelis, P., Rombouts, M., Lauwers, B., Selective laser melting of iron-based powder, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, Vol. 149, pp. 616-622.
- [KRU05] Kruth, J.P., Vandenbroucke, B., Van Vaerenbergh, J., Mercelis, P., Benchmarking of different SLS/SM processes as rapid manufacturing techniques. *International Conference on Polymers & Mould Innovations (PMI)*. Gent (Belgique). 2005.
- [KRU05] Kruth, J.P., Vandenbroucke, B., Van Vaerenbergh, J., Mercelis, P., Benchmarking of different SLS/SM processes as rapid manufacturing techniques. *International Conference on Polymers & Mould Innovations (PMI)*. Gent (Belgique). 2005.
- [KRU07] Kruth, J.-P., Levy, G. , Klocke, F. , Childs, T.H.C. , Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2007, Vol. 56, Issue 2, pp. 730-759.

- [KRY80] Krypianou, L.K., Shape classification in computer aided design. Ph.D. Thesis, 1980.
- [KUL00] Kulkarni, P., Marsan, A., Dutta, D., A review of process planning techniques in layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*. 2000, Vol. 6 n°1, pp. 18-35.
- [LAG08] Laguionie, R., Rauch, M., Hascoet, J.-Y., Toolpaths programming in an intelligent STEP-NC manufacturing context, *Journal of Machine Engineering*. 2008, Vol. 8 n°1-2, pp. 33-43.
- [LAG09a] Laguionie, R., Rauch, M., Hascoët, J.Y., Models, application and demonstration of multi-process manufacturing at IRCCyN, ISO TC 184/SC 1 meetings. 2009, Bath (UK).
- [LAG09b] Laguionie, R., Hascoët, J.Y., Rauch, M., Une plate-forme STEP-NC pour la programmation avancée et intelligente des machines outils. *In proceedings of the 11ème coll. Nat. AIP PRIMECA*. 2009, La Plagne (France).
- [LAG09c] Laguionie, R., Rauch, M., Hascoët, J.-Y., Simulation and optimization in a multi-process environment using STEP-NC. *In proceedings of the 7th IEE International Conference on Control and Automation*. Christchurch (New Zealand), 2009, pp.2384-2391.
- [LAN97] Lan, P.-T., Chou, S.-Y., Chent L.-L., Gemmill, D., Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus. *Computer-Aided Design*. 1997, Vol. 29 n°1, pp. 53-67.
- [LAN09] Lan, H., Web-based rapid prototyping and manufacturing systems: A review, *Computers in Industry*. 2009, Vol. 60, pp. 643-656.
- [LEE03] Lee, W., Bang, Y.B., Design and implementation of an ISO 14649-compliant CNC milling machine, *International Journal of Production Research*. 2003, Vol. 41, pp. 3007-3017.
- [LEE09] Lee, B.E., Suh, S.H., An architecture for ubiquitous product life cycle support system and its extension to machine tools with product data model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009, Vol. 42, pp. 606-620.
- [LEV03] Levy, G., Schindel, R., Kruth, J.P., Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies state of the art and future perspectives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2003, Vol. 52, pp. 589-609.
- [LEV09] Levy, G., The consequent setup of total quality management (TQM) including standard is vital for additive manufacturing. *4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*. 2009 Leiria (Portugal).
- [LEW00] Lewis, G.K., Schlienger, E., Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition. *Materials and Design*, 2000, vol. 21, p. 417-423.
- [LIP09] Lipson, H., Additive Manufacturing File format, 2009. Disponible à l'adresse <http://groups.google.com/group/stl2>, consulté le 04/03/2010.
- [MAE02] Maeder, W., Nguyen, V.K., Richard, J., Stark, J., Standardization of the Manufacturing Process: The IMS STEP-NC Project, *IPLnet Workshop, Sas-Fee* (Switzerland). 10-11 Septembre 2002, pp5.5/1-3.

- [MAS02] Masood, S.H., Soo, A., A rule based expert system for rapid prototyping system selection. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. 2002, Vol. 18, pp. 267-274.
- [MAS03] Masood, S.H., Rattanawong, W., Iovenitti, P., A generic algorithm for a best part orientation system for complex parts in rapid prototyping. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, Vol. 139, pp. 110-116.
- [MEK08] Mekid, S., Pruschek, P., Hernandez J., Beyond intelligent manufacturing: A new generation of flexible intelligent NC machines. *Mechanism and Machine Theory*. 2008, Vol. 44, pp. 466-476.
- [MIN02] Ming, L.W., Gibson, I., Specification of VRML in Color Rapid Prototyping, *International Journal of CAD/CAM*. 2002, Vol. 1 n°1, pp. 1-9.
- [MOG06] Mognol, P., Le Picart, D., Perry, N., Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight. *Rapid Prototyping Journal*. 2006, Vol. 12, pp. 26-37.
- [MOG07] Mognol, P., Rivette, M., Jegou, L., Lesprier, T., A first approach to choose between HSM, EDM and DMLS processes in hybrid rapid tooling. *Rapid Prototyping Journal*. 2007, Vol. 13, n°1, pp. 7-16.
- [NAS06] Nassehi, A., Newman, S.T., Allen, R.D., STEP-NC compliant process planning as an enabler for adaptive global manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2006, Vol. 22, pp. 456-467.
- [NEW03] Newman, S.T., Allen, R.D., Rosso, R.S.U., CAD/CAM solution for STEP-compliant CNC manufacture, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2003, Vol. 16 n° 7-8, pp. 590-597.
- [NEW08] Newman, S.T., Nassehi, A., Xu, X.M., Rosso, R.S.U., Wang, L., Ali, L., Zheng, L.Y., Kumar, S., Vichare, P., Dhokia, V., Strategic advantages of interoperability for global manufacturing using CNC technology, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2008, Vol. 24 n°6, pp.699-708.
- [NOB05] Noblet, V. Trumpf laser forming. *11ème Assises Européennes du Prototypage Rapide*, Paris (France), 2005.
- [PAN07] Pandey, P.M., Venkata, Reddy N., Dhande, S.G., Part deposition orientation studies in layered manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007, Vol. 185, pp. 125-131.
- [PAN08] Panetto, H., Molina, A., Enterprise integration and interoperability in manufacturing systems: Trends and issues, *Computers in Industry*. 2008, Vol. 59, pp. 641-646.
- [PAT02] Patil, L., Dutta, D., Bhatt, A.D., Jurrens, K.K., Lyons, K.W., Pratt, M.J., Sriram, R.D., A proposed standards-based approach for representing heterogeneous object for layered manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*. 2002, Vol. 8 n°3, pp. 134-146.
- [PAU96] Paul, B. K., Baskaran, S., Issues in fabricating manufacturing tooling using powder-based additive freeform fabrication. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996, Vol. 61, pp. 168-172.
- [PEI00] Pei, Y.T., De Hosson, J.Th.M., Functionally Graded Materials produced by laser cladding. *Acta Materiala*, 2000, pp. 2617-2624.

- [PER40] Perera, B.V., US Patent 2,189,592, 1940.
- [PES08] Pessard, E., Mognol, P., Hascoët, J.Y., Gerometta, C., Complex cast parts with rapid tooling: rapid manufacturing point of view. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 39, p. 898-904.
- [PHA98] Pham, D.T., Gault, R.S., A comparison of rapid prototyping technologies. *International journal of machine tools & manufacture*. 1998, Vol. 38, pp. 1257-1287.
- [PIE00] Pierra, G., Représentation et échange de données techniques, Mécanique et Industrie. 2000, Vol. 1 n°1, pp. 397-414.
- [PRA95] Pratt, M., The STEP standard as a geometry transfer medium for SFF, *In NSF Workshop on Design Methodologies for Solid Freeform Fabrication*. 1995, section 6.11.
- [PRA02] Pratt, M.J., Bhatt, A.D., Dutta, D., Lyons, K.W., Patil, L., Sriram, R.D., Progress towards an international standard for data transfer in rapid prototyping and layered manufacturing, *Computer-Aided Design*. 2002, Vol. 34, pp. 1111-1121.
- [RAG07] Raghunath, N., Pandey, P.M., Improving accuracy through shrinkage modeling by using Tagushi method in selective laser sintering. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2007, Vol. 47, pp. 985-995.
- [RAU05] Rauch, M., Hascoet, J.-Y., Remote control of a parallel kinematics machine in an e-manufacturing context. *Journal of Machine Engineering*. 2005, Vol. 5, pp. 95-104.
- [RAU09a] Rauch, M., Bonnard, R., Mognol, P., Hascoët, J.Y., IRCCyN contributions to STEP-NC standard on Rapid Manufacturing processes. *ISO TC184/SC1 meetings*. 2009, Bath (UK).
- [RAU09b] Rauch, M., Laguionie, R., Hascoet, J.-Y., Achieving a STEP-NC Enabled Advanced NC Programming Environment. *Springer London, chap. Advanced Design and Manufacturing Based on STEP*. 2009. pp. 197-214.
- [RAU09c] Rauch, M., Hascoët, J.-Y., Hamann, J.-C., Plenel, Y., Tool path programming optimization for Incremental Sheet Forming Applications. *Computer-Aided Design*. 2009, Vol. 41 n°12, pp. 877-885.
- [RAY06] Ray, S.R., Jones, A.T., Manufacturing interoperability, *Journal Intelligent Manufacturing*. 2006, Vol. 17, pp.681-688.
- [RID10] Ridwan, F., Xu, X., Liu, G., A framework for machining optimisation based on STEP-NC. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2010.
- [RIT06] Ritou, M., Garnier, S., Furet, B., Hascoet, J.-Y., A new versatile in-process monitoring system for milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006, Vol. 46, pp. 2026-2035.
- [RIV07a] Rivette, M., Méthodologie d'obtention d'outillage rapide par l'assemblage de composants élémentaires hybrides. Thèse de doctorat, Université de Nantes et École Centrale de Nantes, 2007, 246 p.
- [RIV07b] Rivette, M., Hascoët, J.Y., Mognol, P., A graph-based methodology for hybrid rapid design. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*. 2007, vol. 221/4, p. 685-697.

- [RIV09] Rivette, M., Mognol, P., Hascoet, J.-Y., Furet, B., Gillot, F., Lesprier, T., Design of hybrid rapid parts with geometrical, manufacturing and assembly points of view. *Virtual and Physical Prototyping*. 2010, pp. .
- [RMP] RM platform , <http://www.rm-platform.com/>, consulté le 04/03/2010.
- [ROB07] Roberts, I.A., Wang, C.J., Esterlein, R., Stanford, M., Mynors, D.J., A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2009, Vol. 49, pp. 916-923.
- [RUA06] Ruan, J., Sparks, T.E., Fan, Z., Stroble, J.K., Panackal, A., Liou, F., A Review of Layer Based Manufacturing Processes for Metals. *In proceedings of 17th Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin (USA). 2006, pp. 233-245.
- [RUM91] Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F., Lorensen, W., *Object Oriented Modelling and Design*, Prentice-Hall International Editions, ISBN 0-13-630054-5, 1991.
- [RYO06] Ryou, M.S., Jee, H.S., Kwon, W.H., Bang, Y.B., Development of a data interface for rapid prototyping in STEP-NC. *International journal of computer integrated manufacturing*. 2006, Vol. 17 n°6, pp. 614-626.
- [SAN06] Santos, E.C., Shiomi, M., Osakada, K., Laoui, T., Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International journal of machine tools & manufacture*. 2006, Vol. 46, pp. 1459-1468.
- [SCH94] Schenck, D., Wilson, P., Information Modelling, The EXPRESS Way, *Oxford University Press*, 1994.
- [SEO06] Seo, Y., Kim, D.Y., Suh, S.H., Development of Web-based CAM system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006, Vol. 28, pp. 101-108.
- [SHI07] Shin, S.-J., Suh, S.-H., Stroud, I., Reincarnation of G-code based part programs into STEP-NC for turning applications, *Computer-Aided Design*. 2007, Vol. 39, pp. 1-16.
- [STE] STEP Tools, www.steptools.com, dernier accès le 05/03/2010.
- [STR00] Stroud, I., Xirouchakis, P., STL and extensions, *Advances in Engineering Software*. 2000, Vol. 31, pp.83-95.
- [STR06] Stroud, I., Xirouchakis, P., Strategy features for communicating aesthetic shapes for manufacturing, *International of Computer Integrated Manufacturing*. 2006, Vol 19 n°6, pp.639-649.
- [STU09] Stucker, B., International Standard for Additive Manufacturing. *4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*. 2009, Leiria (Portugal).
- [SUH02a] Suh, S.H., Chung, D.H., Lee, B.E., Cho, J.H., Hong, H.D., Cheon, S.U., Lee, H.S., Developing an Integrated STEP-Compliant CNC Prototype. *Journal of manufacturing system*. 2002, Vol. 21 n°5, pp. 350-362.
- [SUH02b] Suh, S. H., Cheon, S. U., A Framework for an Intelligent CNC and Data Model, *The International Journal of Advanced Manufactured Technology*. 2002, Vol. 19 n°10, pp. 727-735.

- [SUH03] Suh, S.H., Lee, B.E., Chung, D.H., Cheon, S.U., Architecture and implementation of a shop-floor programming system for STEP-compliant CNC. *Computer-Aided Design*. 2003, Vol. 35 n°12, pp. 1069-1083.
- [SUH06] Suh, S.H., Chung, D. H., Lee, B. E., Shin, S., Choi, I., Kim, K.-M., STEP-compliant CNC system for turning: Data model, architecture, and implementation, *Computer-Aided Design*. 2006, Vol. 38, pp. 677-688.
- [SUH08] Suh, S.H., Kang, S.K., Chung, D.H., Stroud, I., 2008. Theory and Design of CNC Systems, Springer London, chap. STEP-NC System, pp. 395-430.
- [TAI98] Taillandier, G. Bernard, A. Le prototypage rapide. Hermes, 1998.
- [TAN01] Tang, D., Zheng, L., Zhizhong, L., Chin, K.-S., STEP-based product modeling for concurrent stamped part and die development, *Computers in Industry*. 2001, Vol. 46, pp. 75-94.
- [TER04] Terrier, M., Dugas, A., Hascoët, J.-Y., Qualification Of Parallel Kinematics Machines In High Speed Milling On Free Form Surfaces. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2004, Vol. 44 n°7-8, pp. 865-877.
- [THR04] Thrimurthulu, K., Pandey, P.M., Venkata Reddy, N., Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2004, Vol. 44, pp. 585-594.
- [VER09] Verquin, B., Pillot, S. Du prototypage à la fabrication directe. *Lundi de la mécanique du CETIM*, Pau (France), 2009.
- [VIL03] Villeneuve, F., Génération automatique des processus de fabrication. *Fabrication assistée par ordinateur*, Hermes Lavoisier, 2003, p. 295-350.
- [VOL09] Volpato, N., Foggiatto, J.A., The development of a generic Rapid Prototyping process planning system. *4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*. 2009 Leiria (Portugal), p. 381-387.
- [WAN06] Wang, D.-X., Guo, D.-M., Jia, Z.-Y., Leng, H.-W., Slicing of CAD models in color STL format. *Computers in Industry*. 2006, Vol. 57, pp. 3-10.
- [WAN07] Wang, D.X., Leng, H.W., Slicing of CAD Models in ETL Format. *Rapid Prototyping Journal*. 2007, Vol. 13 n°1, 53-57.
- [WEC01] Weck, M., Wolf, J., Kiritsis, D., The STEP compliant NC programming interface evaluation and improvement of the modern interface. ISM Project Forum, 2001.
- [WOH10] Wohlers, T., Wohlers report 2010 – Additive Manufacturing State of the Industry - Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates, 2010.
- [WU06] Wu, T., Cheung, E.H.M., Enhanced STL, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006, Vol. 29 n°11-12, pp. 1143-1150.
- [XU04] Xu, H.W., He, Q., Striving for a total integration of CAD, CAPP, CAM and CNC, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2004, Vol. 20 n°2, pp. 102-109.
- [XU05] Xu, H.W., Wang, H., Mao, J., Newman, S.T., Kramer, T.R., Proctor, F.M., Michaloski, J.L., STEP-compliant NC research-the search for intelligent CAD/CAPP/CAM/CNC integration, *International journal of Production Research*. 2005, Vol. 43 n°17, pp. 3703-3743.

- [XU06] Xu, H.W., Newman, S.T., Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent -- a review of the technologies, *Computers in Industry*. 2006, Vol. 57 n°2, pp.141-152.
- [XU06a] Xu, H.W., Newman, S.T., Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent -- a review of the technologies, *Computers in Industry*. 2006, Vol. 57 n°2, pp.141-152.
- [XU06b] Xu, H.W., Realisation of STEP-NC enabled machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2006, Vol. 22, pp. 144-153.
- [YAK05] Yakovlev, A., Trunovaa, E., Greveya, D., Pilloza, M., Smurov, I., Laser-assisted direct manufacturing of functionally graded 3D objects. *Surface & Coatings Technology*, 2005, Vol. 190, pp. 15-24.
- [YAN96] Yan, X., Gu, P., A review of rapid prototyping technologies and systems. *Computer aided design*. 1996, Vol. 28, pp. 307-318.
- [ZAN03] Zhang, L.-C., Han, M., Huang, S.-H., CS File – An Improved Interface Between CAD and Rapid Prototyping Systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003, Vol. 29 n°21, pp. 15-19.
- [ZAN64] Zang, E.E., US Patent 3,137,080, 1964.

Résumé en français

Les procédés par ajout de matière sont soumis à des changements majeurs depuis ces dernières années. En effet, ils sont passés de procédés de prototypage rapide, à des procédés de fabrication additive pour la réalisation de pièces fonctionnelles. Ces changements ont entraîné de nouvelles attentes en termes de maîtrise de ces procédés. Dans le même temps, il subsiste certains problèmes dus à leur non-intégration dans une chaîne numérique complète et robuste. Ce point ne leur permet pas à l'heure actuelle de rattraper leur retard en terme de développement par rapport aux procédés plus traditionnels.

Les limites de la structure actuelle au niveau de la commande numérique (s'appuyant sur le STL) des machines de fabrication additive ont été identifiées par les travaux de recherche de plusieurs groupes internationaux. La grande majorité a conclu au nécessaire développement d'une nouvelle structure de données basée sur le format STEP, qui apparaît comme étant un format adapté pour obtenir une chaîne numérique complète, robuste et s'appuyant sur des données de haut niveau conceptuel. Le but des travaux de thèse est donc de proposer une nouvelle structuration des données pour le procédé par ajout de matière basée sur le format STEP-NC puis dans le même temps de mettre en place une nouvelle chaîne numérique STEP-NC s'appuyant sur des DCN génériques du même type que ceux utilisés en usage.

La première partie du travail est la mise en place d'un modèle hiérarchisé des données nécessaire pour la description des procédés par ajout de matière. Ce modèle hiérarchisé permet d'identifier et de hiérarchiser toutes les données utiles à l'élaboration d'un projet de fabrication additive. La seconde étape consiste à partir des données du modèle hiérarchisé à la proposition d'un modèle de données STEP-NC pour l'introduction des procédés de fabrication additive dans la norme ISO 14649.

Pour réaliser une chaîne numérique complète basée sur le STEP-NC, les travaux de l'équipe (qui concernent non seulement la fabrication additive mais aussi l'usinage) ont conduit à la mise en place d'une plateforme appelée SPAIM (STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing). Dans cette plateforme la chaîne numérique complète (CAO-FAO-DNC) est intégrée autour d'un unique fichier STEP-NC sans perte d'information. Cette plateforme a de plus l'avantage de pouvoir être intégrée sur toutes les machines de nouvelle génération de fabrication additive équipées avec des DCN génériques.

Mots-clés : Chaîne numérique, Fabrication Additive, STEP-NC, ISO 14649, Echange de données

Titre et résumé en anglais

A PROPOSAL OF DIGITAL CHAIN FOR ADDITIVE MANUFACTURING

Over the last few years, Additive Manufacturing processes have been in constant progress and evolution. Although they were originally reserved as design aids and the manufacturing of prototypes, with the latest evolutions, direct and functional parts can be manufactured. Beside new findings are expected for process mastery. In the same time, many problems subsist because they are not integrated in a complete and robust digital chain. This problem does not enable additive manufacturing processes to catch up on the most traditional processes.

Current limits of numerical control in additive manufacturing (based on STL format) have been identified by many international research groups. Major part of them concluded that a new data structure based on STEP format has to be developed. This format looks as an adapted format to obtain a complete and robust digital chain with high-level information. First, the aim of the thesis works is to propose a new data structure for additive manufacturing processes based on STEP-NC format. Secondly, these works propose to take in place a new STEP-NC digital chain for additive manufacturing, with integration of generic CNC controller on additive manufacturing machine.

The first step of the work was to take in place a hierarchical data model for the description of the additive manufacturing processes. This hierarchical model enables to identify and hierarchy all the data for the management of an additive manufacturing project. The second step is the proposal of STEP-NC data model from data of hierarchical model, in order to introduce additive manufacturing in the ISO 14649 norm.

In order to obtain a STEP-NC digital chain, works of the team (for additive manufacturing but also machining processes) conduct to the proposal of a STEP-NC platform called SPAIM (STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing). In this platform, the complete digital chain (CAD-CAM-CNC controller) is integrated around a unique STEP-NC file without loss of data. Moreover, this platform has the advantage of being integrated on all new generation additive manufacturing machines equipped with generic CNC controller.

Mots-clés : Digital chain, Additive Manufacturing, STEP-NC, ISO 14649, Exchange of data

Discipline : Sciences de l'Ingénieur